

**ADEMAR LUIZ PASTRO**

**AVALIAÇÃO DA TÉCNICA MÚLTIPLO  
ACESSO POR DIVISÃO DE CÓDIGO (CDMA)  
PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA REDE DE  
DADOS SOBRE A REDE ELÉTRICA**

Proposta de dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Eduardo Parente Ribeiro, Dr.

**Curitiba**

**2004**

À minha esposa Denise e aos meus filhos Rodrigo e Luciana, pela compreensão, apoio e incentivo, para que mais este objetivo fosse alcançado.

## **Agradecimentos**

Ao professor Eduardo Parente Ribeiro, pela orientação, sugestões, apoio e incentivo, sem os quais não seria possível a conclusão deste trabalho.

Ao professor Wilson Arnaldo Artuzzi Júnior, pela paciência e boa vontade para esclarecer as dúvidas e compartilhar seu conhecimento.

Aos colegas Michelle Foltran Miranda e Igor Graviloff pelo auxílio e esclarecimentos.

Aos colegas professores do Departamento de Engenharia Elétrica, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos, pelo incentivo e apoio, tanto nos momentos de tristeza e decepção, como nos momentos de alegria.

# Sumário

<b>Agradecimentos.....</b>	iv
<b>Sumário.....</b>	v
<b>Lista de Símbolos.....</b>	vi
<b>Lista de Siglas.....</b>	vii
<b>Lista de Figuras por Capítulo.....</b>	viii
<b>Resumo.....</b>	x
<b>Abstract.....</b>	xi
<b>Capítulo 1 Introdução.....</b>	1
1.1 Histórico.....	2
1.2 Áreas de aplicação.....	3
1.3 Tendências.....	5
1.4 Objetivos .....	6
1.5 Estruturação.....	7
<b>Capítulo 2 Embasamento Teórico - Espalhamento de Espectro.....</b>	8
2.1 Introdução.....	8
2.2 Características dos sinais digitais.....	9
2.3 Espalhamento de Espectro por Sequência Direta.....	13
2.4 Código de Espalhamento - Sequência Pseudo Aleatória.....	16
<b>Capítulo 3 LAN sobre a rede elétrica utilizando CDMA.....</b>	25
3.1 Introdução .....	25
3.2 Configuração proposta para a LAN.....	27
<b>Capítulo 4 Metodologia utilizada nas simulações.....</b>	32
4.1 Conceituação do CDMA.....	32
4.2 Configuração CDMA Analisada.....	33
4.3 A sincronização através da correlação.....	37
4.4 Considerações sobre o ruído na rede elétrica.....	39
4.5 Modelo da metodologia utilizada.....	46
<b>Capítulo 5 Resultados .....</b>	49
5.1 Comparativo entre a teoria e os resultados das simulações.....	49
5.2 Capacidade para o CDMA.....	53
5.3 Taxas de erro observadas para CDMA.....	54
<b>Capítulo 6 Conclusões.....</b>	59
6.1 Conclusões .....	59
6.2 Trabalhos futuros .....	61
<b>Referências .....</b>	62
<b>Anexo I.....</b>	64

# Lista de Símbolos

$A$	- amplitude do pulso
$b(t)$	- sinal binário
$b_t$	- sinal binário gerado pelo transmissor
$b_r$	- sinal binário recuperado
$B$	- largura de banda
$c(t)$	- código de espalhamento
$d_r$	- sinal demodulado
$E_b$	- energia de um bit
$f_c$	- frequência da portadora
$F_s$	- frequência de amostragem
$m_t$	- sinal modulado transmitido
$n(t)$	- ruído adicionado no canal de comunicação
$N$	- comprimento da sequência $PN$
$N_0$	- densidade espectral de potência do ruído unilateral
$P_b$	- probabilidade de erro de bit(bit error rate)
$p_T$	- função pulso retangular
$r(t)$	- sinal recebido
$R$	- taxa da transmissão de bits
$R_a$	- autocorrelação para uma sequência $PN$
$R_c$	- correlação cruzada para sequências $PN$
$R_x$	- autocorrelação para um sinal binário aleatório
$S_x$	- densidade espectral de potência de um sinal binário aleatório
$T$	- tempo
$T_b$	- tempo de duração de um bit
$T_c$	- tempo de duração de um chip
$t_d$	- defasagem de tempo
$t$	- intervalo de tempo
$z(t)$	- sinal desespalhado

## Lista de Siglas

<b>Sigla</b>	<b>Definição</b>	<b>Significado</b>
<b>AWGN</b>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>	Ruído Gaussiano Branco Aditivo
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i>	Taxa de Erro de Bits
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase Shift Keying</i>	Chaveamento Binário por Deslocamento de fase
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i>	Múltiplo Acesso por Divisão de Código
<b>CSMA/CA</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>	Múltiplo acesso através da monitoração da portadora com evitação de colisão
<b>CSMA/CD</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect</i>	Múltiplo acesso através da monitoração da portadora com detecção de colisão
<b>CTP</b>	<i>Carrier Transmission over Powerlines</i>	Transmissão de portadora através da rede elétrica
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i>	Rede de Área Local
<b>MAI</b>	<i>Multiple Access Interference</i>	Interferência de Múltiplo Acesso
<b>MBOK</b>	<i>M-ary bi-orthogonal keying</i>	Chaveamento bi-ortogonal multinível
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais
<b>PN</b>	<i>Pseudo Noise</i>	Pseudo Ruído
<b>RCS</b>	<i>Ripple Carrier Signaling</i>	Sinalização através de portadora
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i>	Relação sinal ruído

# Lista de Figuras por Capítulo

<b>Capítulo 2</b>	<b>Embasamento Teórico - Espalhamento de Espectro</b>	
Fig. 2.1	Representação de um sinal digital $X(t)$ .....	10
Fig. 2.2	Densidade espectral de potência para um sinal digital aleatório.....	11
Fig. 2.3	Autocorrelação para um sinal digital aleatório.....	12
Fig. 2.4	Espalhamento de espectro por seqüência direta.....	13
Fig. 2.5	Densidade espectral de potência de um sinal binário aleatório e densidade espectral do sinal espalhado.....	15
Fig. 2.6	Seqüência pseudo aleatória ( <b>PN</b> ), com período $N = 7$ .....	17
Fig. 2.7	Configuração do registrador de deslocamento de 3 estágios para gerar a seqüência <b>m</b> , $x = 1001011$ .....	17
Fig. 2.8	Transmissão de dados utilizando seqüência <b>PN</b> como código de espalhamento.....	18
Fig. 2.9	Espalhamento de espectro do sinal binário 1010, através da seqüência <b>PN</b> = 1001110.....	19
Fig. 2.10	Recuperação do sinal binário através do “desespalhamento” .....	20
Fig. 2.11	Valor da autocorrelação para uma seqüência <b>m</b> .....	22
Fig. 2.12	Gerador de seqüências Gold, para $N = 7$ .....	24
<b>Capítulo 3</b>	<b>Uma rede local sobre a rede elétrica utilizando CDMA</b>	
Fig. 3.1	Configuração proposta para uma LAN sobre a rede elétrica.....	28
<b>Capítulo 4</b>	<b>Metodologia utilizada nas simulações</b>	
Fig. 4.1	Configuração CDMA utilizada nas simulações.....	33
Fig. 4.2	O correlator como um filtro FIR.....	36
Fig. 4.3	Valor da correlação, obtido na saída do filtro FIR, para uma seqüência de comprimento $N = 31$ .....	37
Fig. 4.4	Sincronização através da correlação, para uma seqüência Gold de comprimento $N = 127$ .....	38
Fig. 4.5	Impedância na rede elétrica, em função da frequência e da topologia, obtida por Radford[1].....	40
Fig. 4.6	Resposta em frequência da rede elétrica observada em medições realizadas por Hansen&Schulz[16].....	41
Fig. 4.7	Resposta em frequência da rede elétrica, observadas em medições realizadas por Hachem e outros[17].....	42
Fig. 4.8	Tipos de ruídos gerados por dispositivos ligados à rede elétrica, observados em medições por Abad e outros[20].....	43
Fig. 4.9	Ruído medido na rede elétrica (amostra r200n) e Densidade Espectral dos três conjuntos de amostras de ruído medido .....	45
Fig. 4.10	Modelo utilizado para as simulações.....	46
<b>Capítulo 5</b>	<b>Resultados</b>	
Fig. 5.1	Comparação entre a taxa de erro teórica e as taxas de erro observadas nas simulações, para 1 usuário.....	50
Fig. 5.2	Comparação entre a taxa de erro teórica e as taxas de erro obtidas nas simulações, considerando 10 usuários e código de espalhamento de	

	comprimento $N = 63$ .....	51
Fig. 5.3	Capacidade teórica do sistema CDMA para um canal sujeito ao ruído AWGN, considerando um erro máximo admissível de $10^{-4}$ .....	53
Fig. 5.4	Taxa de erro de bits CDMA, $N = 15$ – canal com ruído AWGN e canal com ruído medido na rede.....	55
Fig. 5.5	Taxa de erro de bits CDMA, $N = 31$ – canal com ruído AWGN e canal com ruído medido na rede.....	56
Fig. 5.6	Taxa de erro de bits CDMA, $N = 63$ – canal com ruído AWGN e canal com ruído medido na rede.....	57
Fig. 5.7	Taxa de erro de bits CDMA, $N = 127$ – canal com ruído AWGN e canal com ruído medido na rede.....	58



## Resumo

O uso da rede de distribuição de energia elétrica como meio de transmissão de dados é hoje uma realidade. Soluções de diferentes fornecedores, utilizando diferentes tecnologias, estão disponíveis para atender às necessidades deste segmento do mercado de telecomunicações. No entanto, estas tecnologias ainda não estão consolidadas, existindo um volume de pesquisa considerável, com objetivo de definir quais técnicas já utilizadas em canais tradicionais de telecomunicações, poderão ser mais bem adaptadas para a rede elétrica. Neste trabalho é proposta uma configuração para uma rede de dados local (LAN), de modo a viabilizar o compartilhamento da rede elétrica de forma simultânea por todos os usuários, sendo que cada um dos usuários possui um código de espalhamento de espectro específico, permitindo que o mesmo consiga recuperar os dados a ele endereçados. Este trabalho tem por objetivo investigar, através de uma série de simulações, a capacidade do compartilhamento simultâneo da rede elétrica por diversos usuários, utilizando a técnica *Code Division Multiple Access* (CDMA), visando à implantação da configuração de rede proposta, tendo a rede elétrica como meio de comunicação, o que possibilita a abertura de um leque de possíveis aplicações. Foram efetuadas simulações considerando um canal sujeito ao ruído branco gaussiano, bem como com as amostras de ruído obtidas através de medições efetuadas na rede elétrica, permitindo uma comparação do comportamento do sistema nas duas situações.

**Palavras-chave: PLC, CDMA, Rede Elétrica, Espalhamento de Espectro**

# Abstract

The use of powerline as a communication channel is a reality nowadays. Solutions from different suppliers using different technologies are available to provide the needs of this segment of telecommunication market. However these technologies are not established yet, existing a great volume of research in this area in order to define which of those techniques already used in traditional telecommunications channels can be better adapted to use over powerline. In this work a Local Area Network(LAN) configuration is proposed, in order to make possible the simultaneously sharing of powerline by all users, where each user has a specific spreading code allowing the reception of data addressed to him. The aim of this work is to investigate, through a series of simulations, the capacity of simultaneously sharing the powerline by several users using the Code Division Multiple Access (CDMA) technique in order to implement a Local Area Network (LAN) over the powerline, allowing many possible applications. Simulations were performed using a white noise channel and also considering a channel with measured powerline noise in order to compare the behavior of the system in different situations.

Key words: **PLC, CDMA, Powerline, Spread Spectrum.**

## Capítulo 1: Introdução

Na sociedade moderna, denominada por muitos especialistas como sociedade da informação, é crescente a demanda por comunicação de dados, exigindo das empresas responsáveis pelo fornecimento deste tipo de serviço, investimentos cada vez mais elevados em novas tecnologias que propiciem o aumento na capacidade de transmissão, com redução de custos. Neste cenário, a rede de distribuição de energia elétrica representa um meio conveniente para a implementação de uma rede local.

A rede de distribuição de energia elétrica está, necessariamente, presente em todas as instalações prediais, sejam elas de uso residencial, comercial ou industrial, o que a torna atrativa para utilização como canal de comunicação para a transmissão de dados digitais, não havendo necessidade de implantação de uma infraestrutura de cabeamento específico para esta finalidade.

Considerando que, todos os equipamentos elétricos estão obrigatoriamente conectados à rede elétrica, eles poderão ser comandados a partir de qualquer ponto onde a rede esteja presente, abrindo um leque de possíveis aplicações na área de automação e controle, principalmente nas áreas de automação residencial e automação predial. Com certa frequência, a mídia especializada costuma divulgar que num futuro não muito distante, todos os eletrodomésticos instalados em uma residência poderão estar ligados à Internet, podendo ser comandados à distância, através do telefone. Através da rede elétrica, isto é possível sem custo adicional de implantação de uma rede local específica para esta finalidade. Cada eletrodoméstico pode sair da fábrica com um adaptador de rede incorporado de modo que, ao ser ligado à rede elétrica estará automaticamente conectado à rede local, podendo ser comandado a partir de qualquer ponto com acesso a esta rede. Uma pessoa pode, antes de levantar da cama, acionar a cafeteira elétrica, ligar o computador no escritório ou ligar o forno de microondas. Utilizando o telefone celular, através da Internet, esta mesma pessoa poderá ligar o ar condicionado algum tempo antes de chegar em casa, de modo que ao entrar em casa encontre um ambiente com temperatura adequada.

No entanto, o uso da rede elétrica como um canal de comunicação para transmissão de dados representa um desafio, pois a rede elétrica foi projetada e instalada com o propósito de transportar energia elétrica. Como consequência, existem características da rede elétrica que fazem com que a mesma não seja o meio de comunicação mais adequado para a transmissão de dados.

Dentre estas características, podemos enfatizar: mudanças bruscas nas características da rede; alterações na impedância em função da topologia da rede e de cargas sendo ligadas e desligadas; diferentes níveis de atenuação do sinal em função da frequência; diversidade de fontes de ruído contínuos ou impulsivos, além de outros tipos de interferências presentes na rede elétrica[1]-[4].

## 1.1 Histórico

A utilização da rede de distribuição de energia elétrica para a propagação de sinais de telecomunicações não constitui algo novo, sendo conhecida há mais de 50 anos. No início, estes sinais transportavam somente dados e informações de interesse da concessionária de distribuição de energia, com o objetivo de gerenciar e racionalizar a operação do sistema de distribuição de energia elétrica. Estas primeiras experiências utilizavam a tecnologia *Carrier Transmission over Powerlines* (CTP) e *Ripple Carrier Signaling* (RCS) [5].

Em 1991 o CENELEC-Comitê Europeu de Padronização para a Eletrotécnica, criou o padrão EN-50065, estabelecendo os critérios para uso da rede elétrica como meio de transmissão de sinais de telecomunicações na Europa [5].

A abertura e consequente desregulamentação do setor elétrico e do setor de telecomunicações, iniciados na Europa no final da década de 90, trouxeram a possibilidade do consumidor poder escolher a concessionária para a prestação do serviço. As empresas iniciaram então um trabalho no sentido de buscar novos serviços a

serem ofertados, de modo a adicionar valor ao seu “produto” com objetivo de assegurar a fidelidade do consumidor.

Nesta nova realidade do mercado das companhias do setor elétrico, o serviço de comunicação de dados através da rede elétrica representa um elemento fundamental na busca de competitividade, tendo como consequência um maior investimento das concessionárias em pesquisas visando o desenvolvimento de novas tecnologias para transmissão de dados através da rede elétrica. Assim, a tecnologia tem avançado para a chamada última milha, ou seja, a transmissão de dados em alta velocidade para uso da Internet e telefonia [5].

## 1.2 Áreas de aplicação

A atratividade no uso da rede elétrica como meio de comunicação de dados, deve-se à sua grande capilaridade e abrangência, o que implica numa redução de custos de implantação, além de simplificação das instalações pois, os próprios cabos condutores existentes na rede elétrica podem ser utilizados para o tráfego de dados, eliminando a etapa de implantação de uma infraestrutura de cabeamento específico.

A rede de distribuição de energia elétrica é um recurso existente em todas as instalações e que pode, em princípio, ser utilizada como meio de comunicação em qualquer processo onde a transmissão de dados digitais entre dispositivos quaisquer seja necessária. No entanto, existem algumas áreas de aplicação, onde as vantagens de utilização deste recurso são mais significativas.

Sob o ponto de vista da concessionária do serviço de distribuição de energia, esta alternativa pode trazer muitos benefícios nas seguintes atividades:

- **Tele-medição:** a concessionária do serviço de energia elétrica pode realizar a leitura do consumo individual de cada consumidor sem necessidade do empregado que executa esta atividade ter que se deslocar até o local onde

está instalado o medidor. Todos os medidores de energia poderão ter um adaptador de rede incorporado, de modo que a medição periódica do consumo de cada unidade consumidora pode ser feita de forma automática e enviada através da própria rede elétrica, com uma confiabilidade e um detalhamento maior, reduzindo significativamente os custos operacionais das concessionárias

- **Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD):** a concessionária pode, através da existência de um contrato específico com o seu cliente, ligar ou desligar equipamentos elétricos de consumo elevado (como ar condicionado e motores), com objetivo de controlar a demanda de energia em horários determinados do dia.
- **Atendimento de Emergência:** utilizando a transmissão de dados através da rede elétrica, a concessionária tem condições de obter informações de imediato sobre a interrupção no fornecimento de energia elétrica em determinado trecho de circuito, podendo desta forma acionar as equipes de reparo em um prazo mais curto, reduzindo o tempo total de interrupção e racionalizando o trabalho de suas equipes.

Nas áreas de automação residencial, automação predial e sistemas de segurança, é possível ter equipamentos comandados à distância, através de sinais de controle enviados por uma central, através da própria rede elétrica.

- Em uma residência, todos os eletrodomésticos poderiam ser comandados à distância, a partir de qualquer dispositivo de comando conectado à rede. Dispositivos de segurança como câmeras e alarmes poderão ser interligados através da rede elétrica, sem necessidade de cabos adicionais. Pode-se implantar um sistema de distribuição de som através da rede elétrica;

- Em um conjunto de escritórios, os computadores, impressoras, fax, telefones e outros equipamentos podem estar ligados através da rede elétrica, sem necessidade de infra-estrutura adicional;
- Em uma instalação industrial, as máquinas podem estar conectadas através da rede elétrica, permitindo gerenciar o funcionamento das mesmas, sem necessidade de implantação de um cabeamento estruturado para esta finalidade.

A rede elétrica pode também, ser utilizada para implantar a espinha dorsal de uma rede local de computadores (LAN) para acesso à Internet.

### 1.3 Tendências

A utilização da rede de distribuição de energia elétrica como meio de transmissão de dados é atualmente uma realidade, estando disponível no mercado internacional, soluções de diferentes fabricantes, com diferentes tecnologias, para atender às necessidades deste segmento da área de comunicação, como a *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) atualmente utilizada por diversos fabricantes em suas respectivas soluções. O OFDM é um sistema de acesso múltiplo, bastante robusto, onde a largura de banda é subdividida em diversos subcanais, cada um com sua portadora específica [5].

No entanto, a tecnologia para a utilização da rede elétrica como canal para transmissão de dados não está ainda consolidada, existindo um volume de pesquisa considerável nesta área do conhecimento, com objetivo de definir quais técnicas, já consagradas no mercado tradicional de telecomunicações, podem ser mais bem adaptadas para uso na rede elétrica

Neste contexto, considerando as peculiaridades da rede elétrica quando utilizada como canal de comunicação, o qual está sujeito a uma grande variedade de fontes de ruído e interferências, além de mudanças bruscas em suas características, as técnicas de

espalhamento espectral são adequadas para a transmissão de dados através da rede elétrica. Dentre estas técnicas pode ser destacada a *Direct Sequence/Code Division Multiple Access* (DS/CDMA), que é objeto deste trabalho

O CDMA é um sistema de acesso múltiplo a um canal de comunicação, onde todos os participantes compartilham a mesma largura de banda de forma assíncrona. Cada participante possui um código de espalhamento de espectro individual (código de acesso), que é desconhecido pelos demais. Deste modo, somente o participante que possui aquele código específico tem acesso ao sinal a ele endereçado. Para os demais participantes, este sinal é percebido como ruído de fundo. [10], [11], [12].

## 1.4 Objetivos

O objetivo desta dissertação é investigar e avaliar, através de uma série de simulações, o desempenho de uma rede local sobre a estrutura já existente da rede elétrica, utilizando a técnica CDMA.

É proposta uma configuração alternativa para uma rede de dados local sobre a rede elétrica utilizando CDMA, com possibilidade de comunicação ponto a ponto (“*peer-to-peer*”) na qual é considerado o compartilhamento simultâneo da rede elétrica por um determinado número de usuários.

No desenvolvimento do trabalho, foi realizada uma série de simulações, considerando um canal com ruído gaussiano e também simulações utilizando um conjunto de amostras de dados reais, medidos na rede elétrica. Estas simulações foram efetuadas com objetivo de comparar o comportamento do canal nas duas situações, bem como avaliar o número de usuários que podem compartilhar simultaneamente o canal de comunicação —neste caso a rede elétrica— mantendo a taxa de erro de bits (BER) dentro de níveis aceitáveis.



Como resultado destas simulações, são apresentados gráficos comparativos, mostrando a taxa de erro de bits, em função do número de usuários e do comprimento do código de espalhamento utilizado.

## **1.5 Estruturação**

No capítulo 2 é apresentado um embasamento teórico sobre o espalhamento de espectro e a técnica CDMA. No capítulo 3 é feita uma revisão da bibliografia e apresentada a proposta de uma LAN sobre a rede elétrica utilizando CDMA. O capítulo 4 trata da metodologia utilizada nas simulações efetuadas, enquanto o capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas simulações. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões bem como os comentários finais sobre os resultados obtidos.

## Capítulo 2: Embasamento Teórico - Espalhamento de Espectro

### 2.1 Introdução

A tecnologia de comunicação utilizando espalhamento de espectro foi inicialmente desenvolvida para uso em comunicações na área militar, com o propósito de aumentar a imunidade do sinal com relação à interferência, intencional ou não intencional, além de permitir uma comunicação segura em um ambiente sujeito a muito ruído e interferências, dificultando a captação por um receptor não desejado [10], [11], [12].

Atualmente, a modulação por espalhamento de espectro é largamente utilizada nas comunicações sem fio.

As características principais do espalhamento de espectro são:

- A largura da faixa de frequências utilizada é muitas vezes maior do que a largura da faixa de frequências do sinal que contém a informação a ser transmitida;
- Alta imunidade à interferência não intencional, através de outro transmissor tentando enviar uma mensagem pelo mesmo canal, ou intencional, através de um transmissor hostil tentando perturbar o sinal transmitido;
- Dificuldade de reconhecimento e recepção do sinal transmitido, por receptores não autorizados;
- Possibilita o acesso múltiplo a uma mesma faixa do espectro de frequências, por um grande número de usuários independentes;
- O espalhamento do espectro é feito, antes da transmissão do sinal, a partir de um código de espalhamento que é independente dos dados transmitidos. Este mesmo código é utilizado no receptor para recuperar a sequência original dos dados transmitidos.

Em sistemas de comunicação utilizando espalhamento de espectro, a largura de banda do sinal é expandida, normalmente em muitas ordens de magnitude, antes da transmissão. No caso do sistema estar sendo utilizado por somente um usuário, a utilização da banda é ineficiente. Entretanto, em um ambiente multi-usuário, todos os participantes utilizam a mesma banda simultaneamente, tornando o sistema eficiente do ponto de vista de utilização da banda.

## 2.2 Características dos sinais digitais

Um sinal digital banda base (não modulado) é formado por uma sequência aleatória de símbolos binários (bits) **1** e **0** que, na forma bipolar, podem ser representados por pulsos retangulares de amplitude  $+A$  e  $-A$  respectivamente.

Cada pulso corresponde a um bit do sinal, com uma duração  $T$ , sendo  $1/T$  a taxa de transmissão de bits.

A função correspondente a um sinal binário qualquer  $X(t)$ , pode ser representada como:

$$X(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k p_T(t - t_d - kT) \quad (1)$$

onde:

$p_T$  é a função pulso retangular de magnitude unitária, definida por:

$$p_T = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

$T$  é a duração de um bit,

$\{A_{-k}, \dots, A_{-2}, A_{-1}, A_0, A_1, A_2, \dots, A_k\}$  são variáveis aleatórias, com valores  $\pm A$  distribuídos com igual probabilidade,

$t_d$  é uma variável aleatória com valor entre  $0$  e  $T$ .

Na figura 2.1, está representada uma amostra de um sinal digital  $X(t)$ .

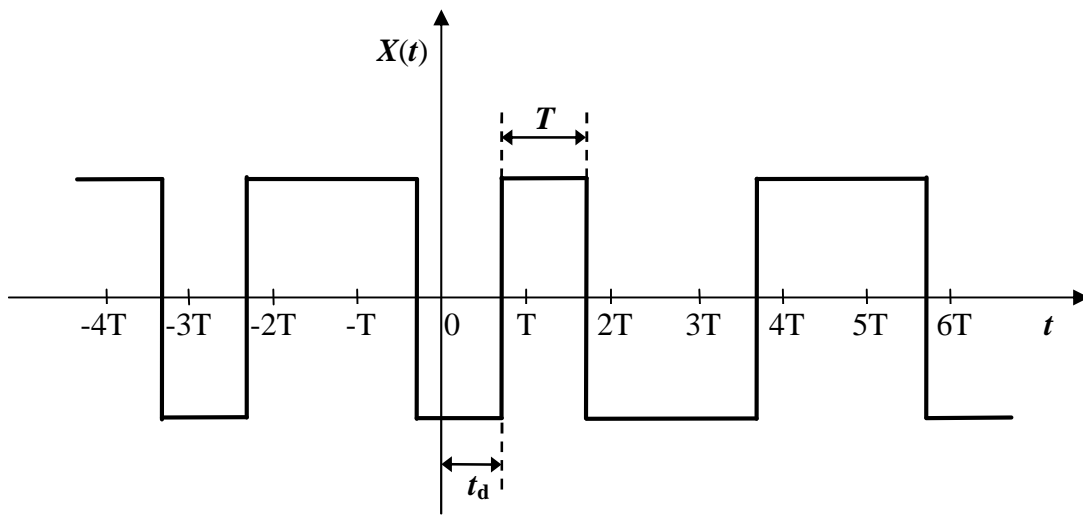


Fig. 2.1 – Representação de um sinal digital  $X(t)$

### 2.2.1 Densidade Espectral de Potência

A densidade espectral de potência  $S_X(f)$  mostra como a potência média do sinal está distribuída no domínio da frequência  $f$ . Para um sinal digital aleatório  $X(t)$  de amplitude  $A$  e taxa de transmissão  $1/T$ , a densidade espectral de potência é dada pela equação [11]:

$$S_X(f) = A^2 T \left[ \frac{\sin(p \cdot fT)}{p \cdot fT} \right]^2 \quad (3)$$

Na figura 2.2 está representado o gráfico da densidade espectral de potência, para um sinal digital aleatório, com taxa de transmissão de 1000 bps e frequência de amostragem  $F_s = 16.000$  Hz.

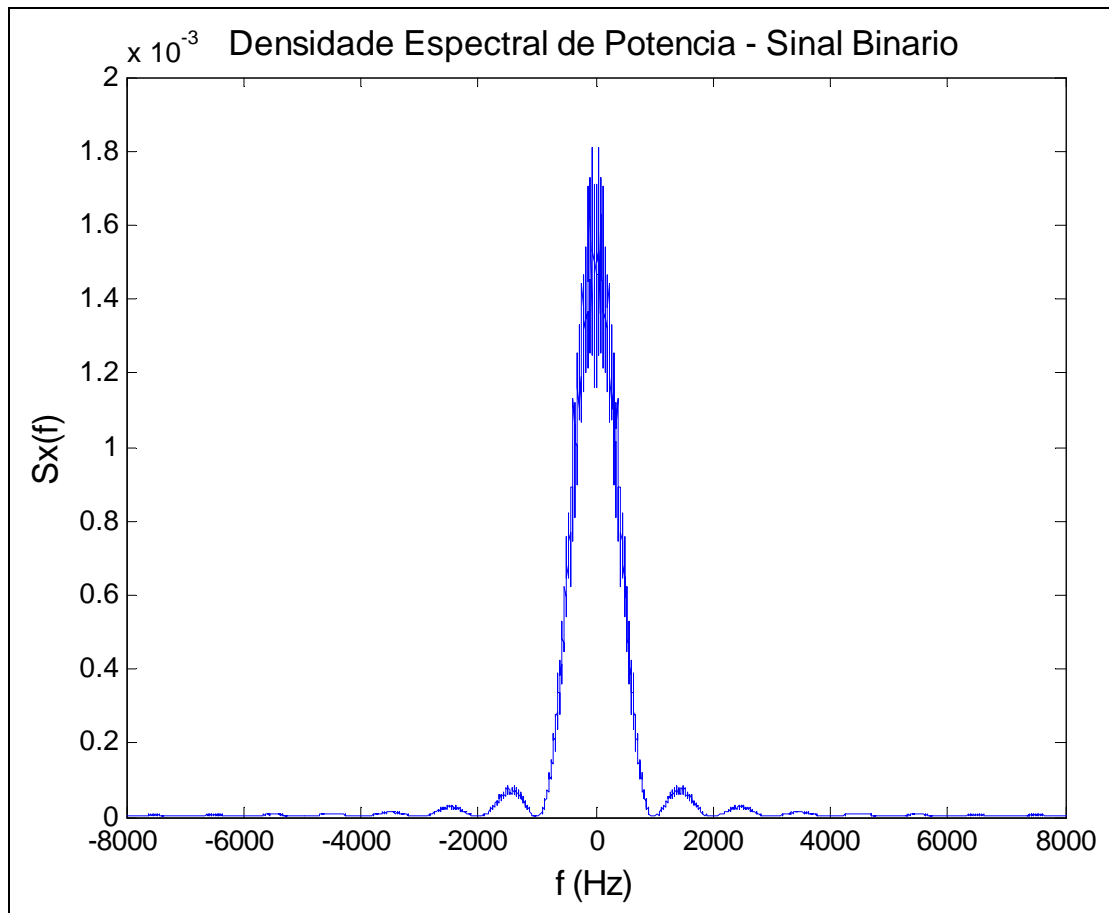


Figura 2.2 - Densidade Espectral de potência para um sinal digital aleatório

Como pode ser observado, pelo gráfico da densidade espectral de potência, a amplitude máxima do espectro é diretamente proporcional ao tempo de duração de um bit ( $A^2T$ ), e o lóbulo principal ocorre em  $1/T$ , valor este que corresponde aproximadamente, à largura de faixa do sinal  $X(t)$ .

Desta forma, pode-se constatar que, quanto menor for o valor de  $T$ , ou seja, quanto maior a taxa de transmissão de bits, maior será a largura de banda do sinal e menor será a amplitude da densidade espectral de potência.

### 2.2.2 Autocorrelação

A autocorrelação  $R_X(t)$  define o grau de similaridade existente entre duas variáveis aleatórias obtidas pela observação de um processo aleatório, com intervalos de tempo  $t$  entre as observações.

A densidade espectral de potência  $S_X(f)$  e a função autocorrelação  $R_X(t)$ , formam um par de transformadas de Fourier [11]:

$$S_X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_X(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

$$R_X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (5)$$

A autocorrelação para um sinal digital aleatório é obtida através expressão [11]:

$$R_X(t) = \begin{cases} A^2 \left( 1 - \frac{|t|}{T} \right) & |t| < T \\ 0, & |t| \geq T \end{cases} \quad (6)$$

O gráfico correspondente à autocorrelação, para um sinal digital aleatório, está mostrado na figura 2.3.

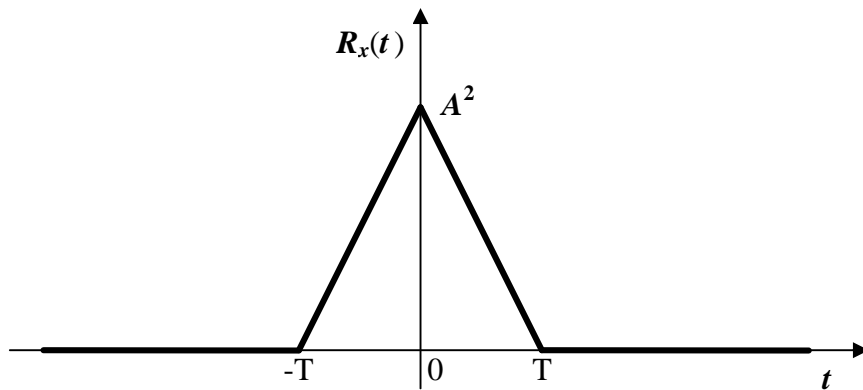


Figura 2.3 - Autocorrelação para um sinal digital aleatório

A equação (6) — bem como o gráfico da figura 2.3—, mostram que os sinais  $X(t)$  e  $X(t+t)$  possuem a máxima similaridade quando  $t = 0$ , alguma similaridade quando  $0 < |t| < T$  e não possuem nenhuma similaridade quando  $|t| > T$ .

Considerando que  $T$  é o tempo de duração de cada bit do sinal, fica claro que quanto maior for a frequência de variação do processo randômico  $X(t)$ , mais rapidamente a função auto correlação  $R_x(t)$  decresce a partir do seu valor máximo  $R_x(0)$ , à medida que  $t$  aumenta.

### 2.3 Espalhamento de Espectro por Seqüência Direta

No espalhamento de espectro por seqüência direta (DS-SS), um sinal binário de banda estreita é multiplicado por um sinal binário aleatório (código de espalhamento) de banda larga, ou seja, com uma taxa de bits bem maior que a taxa de bits do sinal original. O sinal resultante desta multiplicação é também um sinal de banda larga, com largura de banda aproximadamente igual à largura de banda do sinal binário aleatório utilizado [12].

No esquema mostrado na figura 2.4,  $b(t)$  é o sinal binário original —sinal de banda estreita— e  $c(t)$  é um sinal binário aleatório de banda larga, com  $N$  bits de comprimento e amplitude  $\pm 1$ .

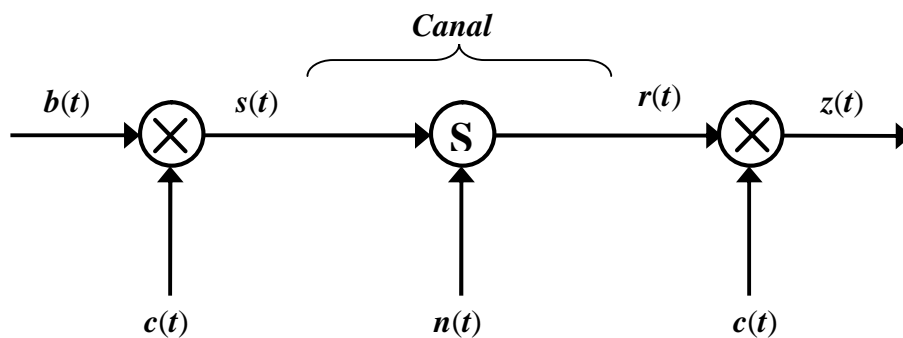


Figura 2.4 - Espalhamento de espectro por seqüência direta

O sinal  $c(t)$ , é também denominado código de espalhamento, sendo  $s(t)$  o sinal espalhado a ser transmitido através canal de comunicação.

O sinal com espectro espalhado, a ser transmitido é:

$$s(t) = b(t) \cdot c(t) \quad (7)$$

No canal de comunicação, são adicionados ruídos e interferências, representados na figura por  $n(t)$ . Assim, o sinal recebido  $r(t)$ , é composto pelo sinal transmitido  $s(t)$  mais o ruído ou interferência adicionados no canal de comunicação.

Portanto:

$$r(t) = s(t) + n(t) = b(t) \cdot c(t) + n(t) \quad (8)$$

A recuperação do sinal original  $b(t)$  é feita multiplicando o sinal recebido  $r(t)$  pelo mesmo código binário utilizado no espalhamento.

Assim,

$$z(t) = c(t) \cdot r(t) = c^2(t) \cdot b(t) + c(t) \cdot n(t) \quad (9)$$

Considerando que a amplitude do sinal  $c(t)$  é  $\pm 1$ , tem-se  $c^2(t) = 1$ .

Portanto,

$$z(t) = b(t) + c(t) \cdot n(t) \quad (10)$$

Pela equação (10), pode-se observar que, o sinal de saída  $z(t)$  é formado pelo sinal  $b(t)$ , cujo espectro original foi restaurado, acrescido do componente  $c(t) \cdot n(t)$ , que representa o ruído e a interferência que foram adicionados no canal de comunicação.



Esta interferência adicionada por sua vez, também tem o seu espectro espalhado pelo mesmo código de espalhamento, e aparece como ruído para o receptor.

Da mesma forma, o sinal com espectro espalhado que foi transmitido através do canal de comunicação, é percebido como ruído para um receptor que desconhece o código que foi utilizado no processo de espalhamento.

Na figura 2.5, está mostrado um gráfico comparativo entre a densidade espectral de potência de um sinal binário com uma taxa de transmissão = 1000 bps e frequência de amostragem  $F_s = 16.000$ , com a densidade espectral deste mesmo sinal com espectro espalhado através de um código de espalhamento aleatório com tamanho de  $N = 8$ .

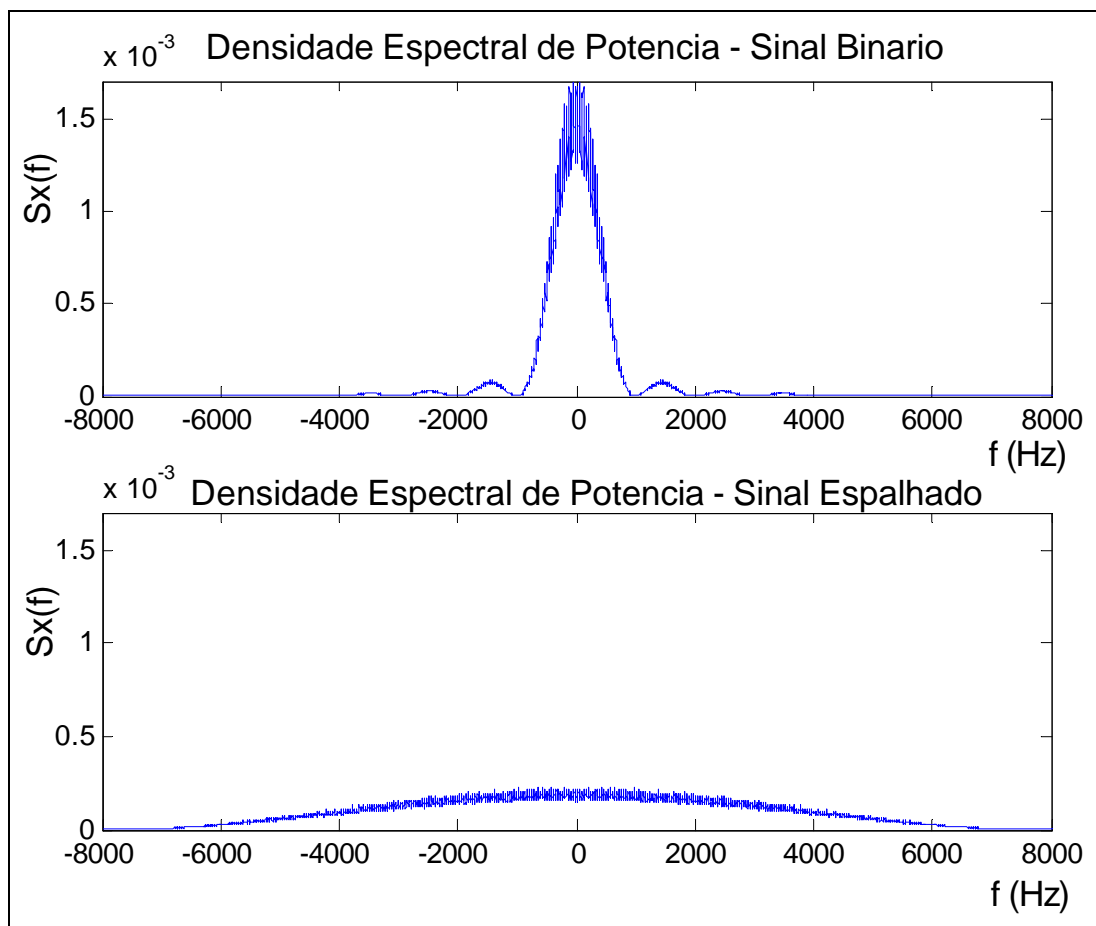


Figura 2.5 – Densidade espectral de potência de um sinal binário aleatório e densidade espectral do sinal espalhado.

Através do gráfico da figura 2.5, pode ser observado que a largura da faixa do sinal espalhado está multiplicada por 8, o que corresponde ao comprimento do código de espalhamento utilizado. À medida que aumenta o comprimento do código utilizado para o espalhamento, a densidade espectral do sinal vai espalhando na mesma proporção, aproximando-se da densidade espectral do ruído branco. Desta forma, para um receptor que não conhece o código de espalhamento, este espectro é confundido com o espectro do ruído branco.

## 2.4 Código de Espalhamento - Sequência Pseudo Aleatória

Como foi visto anteriormente, o espalhamento do espectro de um sinal binário a ser transmitido, é feito através da multiplicação —no lado do transmissor— deste sinal por um código de espalhamento. O código de espalhamento consiste de um sinal binário aleatório de banda larga. O receptor por sua vez, deverá utilizar este mesmo código para recuperar o sinal original.

No entanto, se o código utilizado no processo de espalhamento for efetivamente aleatório, o receptor não tem condições de reproduzi-lo. Desta maneira, seria impossível para o receptor recuperar o sinal original que foi transmitido.

### 2.4.1 Características da sequência Pseudo Aleatória

Para resolver o problema da reprodução do código de espalhamento pelo receptor, para a recuperação do sinal, ao invés de se utilizar um código aleatório para o espalhamento do espectro, é utilizada a chamada *sequência pseudo-aleatória*, também conhecida como sequência **PN** (*Pseudo-Noise*). A sequência pseudo-aleatória é um código determinístico, formado por um sinal binário que se repete com um período

determinado. Esta seqüência é conhecida apenas pelo transmissor e pelo receptor do sinal.

Na figura 2.6, está representada uma seqüência **PN** com tamanho  $N = 7$ . Cada um dos pulsos que formam a seqüência, é denominado **chip**, sendo  $T_c$  o tempo de duração de um chip.

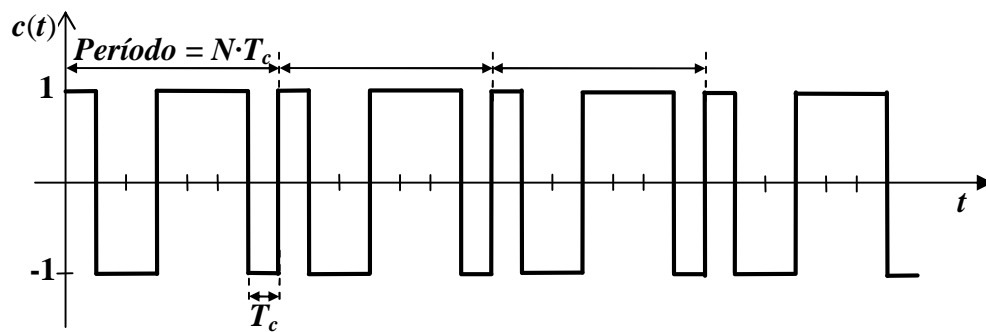


Figura 2.6 - Seqüência pseudo aleatória (**PN**), com período  $N = 7$

A seqüência **PN** que está mostrada na figura 2.6 é 100111010011101001110.... que, como pode ser observado, possui um período  $N \cdot T_c$ , com  $N = 7$ .

Uma classe importante de seqüências **PN**, são as seqüências binárias de comprimento máximo, denominadas de seqüências **m**, que podem ser obtidas utilizando registradores de deslocamento e operações de soma binária (módulo 2).

A partir de um registrador de deslocamento com  $n$  estágios, é possível gerar uma seqüência **m**, com período  $N = 2^n - 1$  [12].

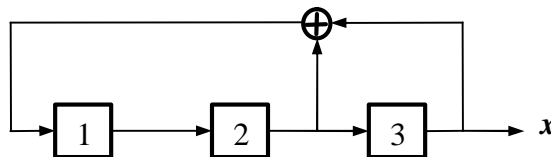


Figura 2.7 - Configuração do registrador de deslocamento de 3 estágios para gerar a seqüência **m**,  $x = 1001011$

Através de uma análise do registrador de deslocamento de 3 estágios, cuja configuração está mostrada na figura 2.7, pode-se observar que o mesmo tem a finalidade de gerar a sequência  $m$  1001011 na saída  $x$ , considerando que o estado inicial do registrador seja 001.

#### 2.4.2 Espalhamento de espectro de um sinal binário através de uma sequência $PN$

No espalhamento de espectro de um sinal binário através de uma sequência  $PN$ , a sequência deve ser conhecida tanto pelo transmissor como pelo receptor do sinal. Somente o receptor que conhece a sequência tem condições de recuperar o sinal transmitido, através de uma operação de “desespalhamento”, que é feita multiplicando o sinal recebido pela mesma sequência  $PN$  que foi utilizada no processo de espalhamento.

Na figura 2.8 está representado, de forma simplificada, o diagrama em blocos de um sistema para transmissão de dados utilizando espalhamento de espectro através de uma sequência  $PN$ .

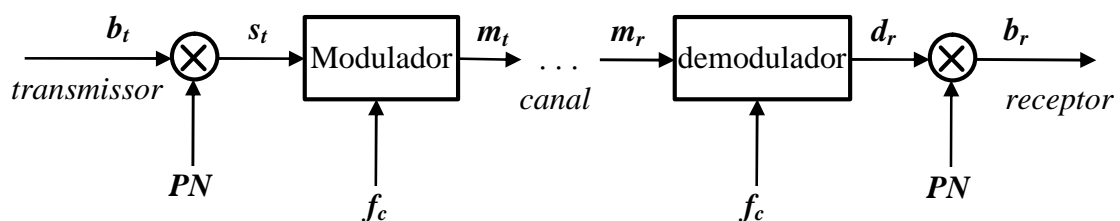
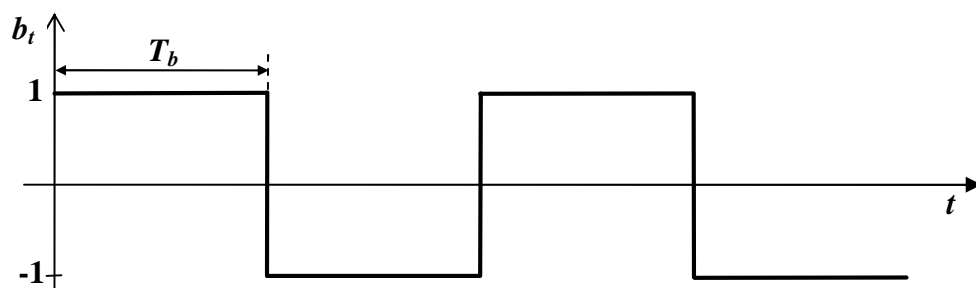


Figura 2.8 - Transmissão de dados utilizando sequência  $PN$  como código de espalhamento

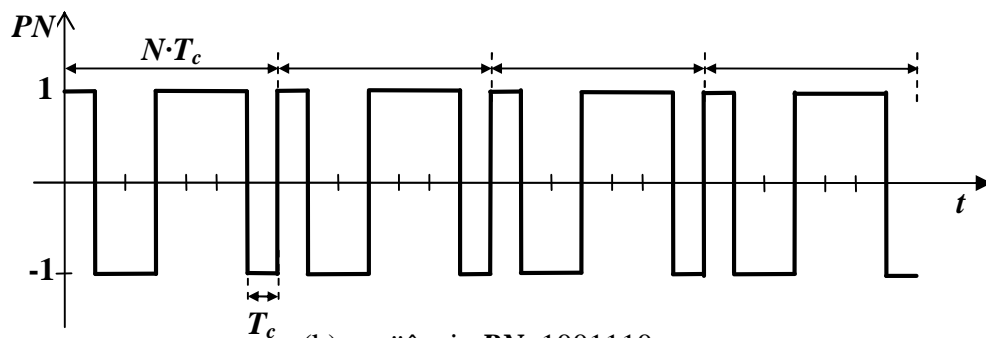
No esquema apresentado na figura 2.8, o transmissor gera o sinal binário  $b_t$ , que é formado por uma sequência de pulsos (bits), conforme o exemplo mostrado na figura

2.9(a), sendo  $T_b$  a duração de um bit. O sinal binário que é mostrado na figura 2.9(a), corresponde à seqüência de bits: 1010.

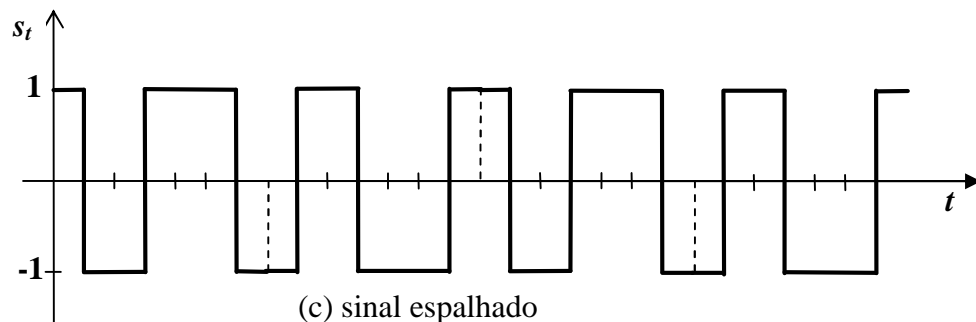
Em seguida, o sinal binário tem sua densidade espectral de potência espalhada, através da multiplicação do sinal binário pela seqüência  $PN = 1001110$ , mostrada na figura 2.9(b). Como resultado, tem-se o sinal com espectro espalhado  $s_t$ , mostrado na figura 2.9(c). A largura da banda do sinal espalhado  $s_t$  é igual à largura de banda da seqüência  $PN$  utilizada para o espalhamento.



(a) sinal binário: 1010



(b) seqüência  $PN$ : 1001110



(c) sinal espalhado

Figura 2.9 - Espalhamento de espectro do sinal binário 1010, através da seqüência  $PN = 1001110$

O sinal com densidade espectral de potência espalhada é então modulado, através do método de modulação selecionado, sendo o sinal modulado  $m_t$  transmitido através do canal de comunicação.

No receptor, o sinal recebido  $m_r$  passa pelo processo de demodulação, sendo obtido o sinal demodulado  $d_r$ , mostrado na figura 2.10(a). Na sequência, este sinal demodulado é “desespalhado”, através da multiplicação do sinal demodulado pela mesma sequência  $PN$  utilizada no transmissor para o espalhamento, tendo como resultado, o sinal binário recuperado  $b_r$ , mostrado na figura 2.10(c)

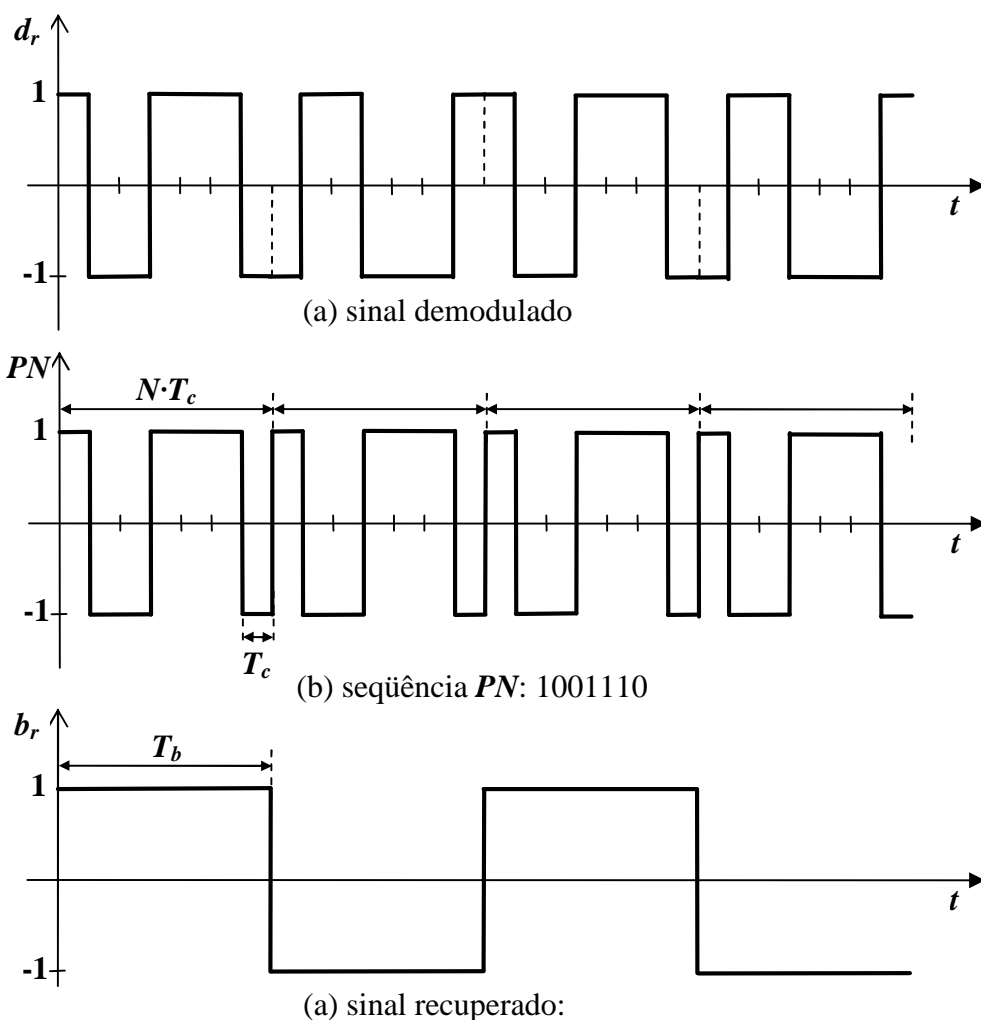


Figura 2.10 - Recuperação do sinal binário através do “desespalhamento”

Somente um receptor que conheça a sequência ***PN*** que foi utilizada para o espalhamento, tem condições de recuperar o sinal transmitido. Para um receptor que não conheça esta sequência, o sinal é recebido como ruído.

Embora não seja mostrado explicitamente no esquema apresentado na figura 2.8, é necessário que exista uma sincronização do sinal recebido com a portadora, para o processo de demodulação, bem como uma sincronização do sinal demodulado com a sequência ***PN***, de modo que a operação de “*desespalhamento*” possa ser feita de forma correta.

#### 2.4.3 Autocorrelação para uma sequência ***m***

Sendo a sequência ***m*** um sinal determinístico periódico, a autocorrelação para uma sequência ***m*** é também um sinal periódico. O valor da autocorrelação para uma sequência ***m***, aqui denominada ***c(t)***, com tempo de duração de um chip igual a  $T_c$  e período igual a  $N \cdot T_c$ , é obtida pela expressão [12]:

$$R_a(t) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} c(t+t)c(t)dt \quad (11)$$

De onde se obtém,

$$R_a(t) = \begin{cases} 1 - \frac{|t|}{T_c} \left(1 + \frac{1}{N}\right), & 0 \leq |t| \leq T_c \\ -\frac{1}{N}, & \text{para o restante do período} \end{cases}$$

O gráfico correspondente à autocorrelação para uma sequência ***m*** está mostrado na figura 2.11, através do qual pode ser observado que a autocorrelação atinge seu valor máximo quando o sinal está sincronizado com a sequência ***m***, possuindo valor  $-1/N$

quando não sincronizado. Esta característica da autocorrelação é utilizada para o processo de sincronização do sinal.

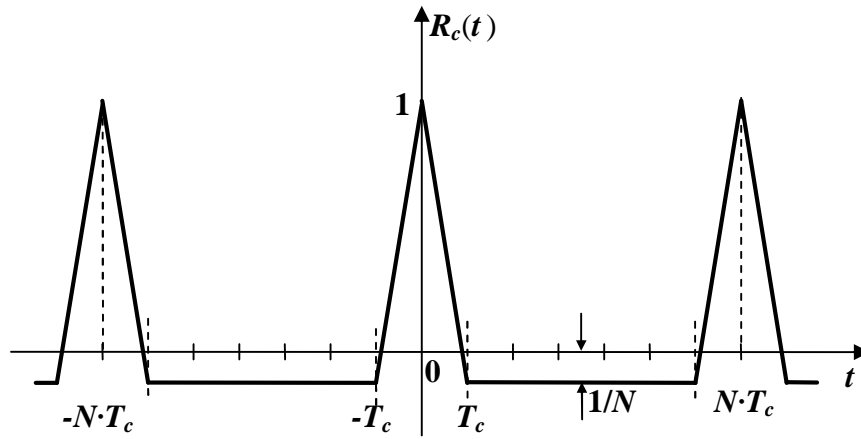


Figura 2.11 - Valor da autocorrelação para uma sequência  $m$

#### 2.4.4 Correlação cruzada

A correlação cruzada entre duas seqüências  $PN$ (códigos de espalhamento),  $c_1$  e  $c_2$ , define o grau de similaridade existente entre as mesmas, sendo determinada pela expressão:

$$R_c(t) = \frac{1}{NT_c} \int_0^{NT_c} c_1(t+t)c_2(t)dt \quad (12)$$

Quando a correlação cruzada entre dois códigos distintos  $R_c(t)$  for igual a zero para todo  $t$ , os códigos são ditos ortogonais. Quando existirem diversos usuários compartilhando a mesma faixa de frequência em um canal de comunicação, se os códigos forem ortogonais não existe interferência entre os usuários. Quando os códigos não são perfeitamente ortogonais, a correlação cruzada entre os códigos causa uma degradação na performance, limitando o número máximo de usuários simultâneos.



### 2.4.5 Sequências Gold

Para um sistema de comunicação assíncrono de acesso múltiplo, como é o caso do sistema proposto neste trabalho, é necessário utilizar um conjunto com uma quantidade suficiente de seqüências  $PN$ , as quais devem possuir baixos valores de correlação cruzada, de modo a possibilitar a separação dos canais. Além disso é desejável uma baixa autocorrelação para deslocamentos maiores que um bit para permitir o processo de sincronização. As seqüências  $m$  não são adequadas a esta finalidade pois, embora possuam bons valores de autocorrelação, apropriados ao processo de sincronização do sinal, a quantidade de seqüências  $m$  para um dado comprimento de código é baixa, possibilitando que um número muito pequeno de usuários realizem a comunicação simultânea.

Uma importante classe de seqüências  $PN$ , são as seqüências **Gold**, que possuem boa autocorrelação e uma correlação cruzada controlada. Um conjunto de  $N + 2$  seqüências Gold pode ser obtido a partir de duas seqüências  $m$  de comprimento  $N$ . As seqüências Gold são obtidas somando bit a bit uma das seqüências  $m$  com as  $N$  versões deslocadas da outra seqüência  $m$  [12].

Na figura 2.12 está mostrada a estrutura com os registradores de deslocamento de 3 estágios, necessária para produzir um conjunto de seqüências Gold de comprimento  $N = 7$ , a partir de duas seqüências,  $x$  e  $y$ , de comprimento  $N = 7$ .

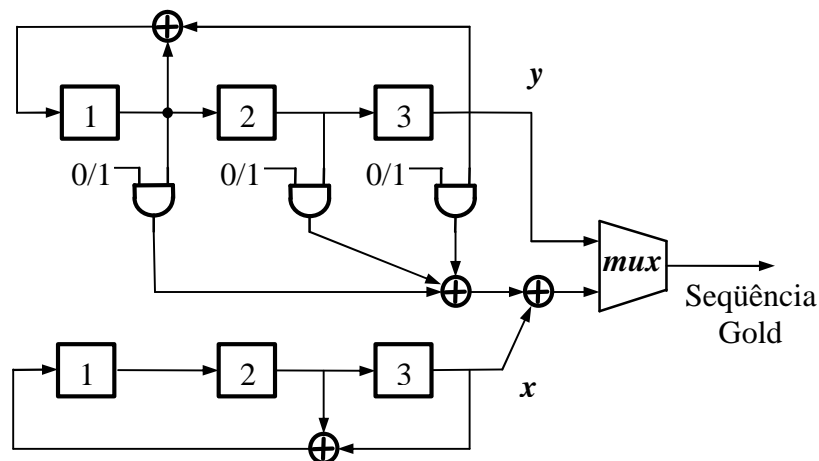


Figura 2.12 - Gerador de seqüências Gold, para  $N = 7$

Os registradores de deslocamento mostrados na figura 2.12, produzem as seqüências  $x = 1001011$  e  $y = 1001110$  respectivamente.

Através da habilitação/desabilitação das portas AND mostradas na figura 2.12, são obtidas 7 versões deslocadas da seqüência  $y$ , que são somadas bit a bit com a seqüência  $x$ , produzindo assim o conjunto de seqüências Gold com comprimento  $N = 7$ .

Na estrutura mostrada na figura 2.12, as seqüências obtidas são:

1001011( $x$ )	1001110( $y$ )	0000101
1010110	1110001	0111111
0100010	0011000	1101100

Pode-se observar que, no conjunto de seqüências obtidas, estão incluídas as duas seqüências  $m$  originais,  $x = 1001011$  e  $y = 1001110$ .

## Capítulo 3: Uma rede local sobre a rede elétrica utilizando CDMA

### 3.1 Introdução

Dos trabalhos publicados nesta área que foram pesquisados, a maioria aborda o uso de técnicas de espalhamento de espectro com objetivo de transmitir os bits de dados em paralelo através de sub-canais na rede elétrica, visando aumentar a velocidade de transmissão.

Van Der Gracht[14] propõe a modulação através de seqüências *PN*, para a transmissão de dados através da rede elétrica, visando contornar o problema da degradação do sinal em determinadas faixas de frequência. Também propõe a utilização da passagem por zero do sinal de 60 Hz, como forma de sincronizar o espalhamento e desespalhamento do sinal através da seqüência *PN*.

Marubayashi e Tachikawa[4] abordaram a proposta de um sistema denominado Sistema de Espalhamento de Espectro Paralelo Combinatório (PC/SS), que consiste na transmissão simultânea de grupos de 10 bits utilizando um conjunto de 10 seqüências *PN*, com objetivo de conseguir uma maior taxa de transmissão, considerando a limitação de banda disponível para utilização na rede elétrica.

O artigo de Lehmann[15] sugere o uso de técnicas de espalhamento de espectro para a transmissão de dados através da rede elétrica, abordando o aspecto da modulação multicanal, utilizando seqüências *PN* ortogonais, visando transmitir os bits de dados em paralelo.

Hooijen[8] aborda o sistema de espalhamento de espectro por seqüência direta, utilizando modulação PSK (DS/PSK), sugerindo a divisão da largura total da banda em sub-bandas, de modo a permitir a transmissão de dados em paralelo. A proposta apresentada é no sentido dividir o canal em  $n$  sub-canais, transmitindo os bits em paralelo através de cada sub-canal.

O trabalho de Hensen e Schulz[16] aborda as vantagens da utilização de técnicas de espalhamento de espectro, mais especificamente o CDMA, para a transmissão de dados através da rede elétrica. Neste artigo, é citada de passagem, sem entrar em maiores detalhes, a possibilidade de se utilizar o CDMA para o desenvolvimento de um sistema de múltiplo acesso, onde diversos usuários poderiam compartilhar a rede elétrica para a transmissão de dados.

Hachem et al.[17] abordam o uso da técnica CDMA para a transmissão de dados em paralelo através da rede elétrica, utilizando seqüências **PN** distintas em cada um dos sub-canais. De acordo com o caso citado, considerando uma taxa de bits de 64 kbps e, dividindo o canal em 32 sub-canais (utilizando seqüência **PN** com  $N = 64$ ), é possível atingir uma taxa de transmissão de 2.048 bps.

Da mesma forma Chen e Chiueh[3] enfocam a transmissão dos bits em paralelo através da rede elétrica, utilizando técnicas de espalhamento de espectro, em um esquema denominado **MBOK**, onde os bits componentes de cada símbolo são transmitidos em paralelo, através de sub-canais, sendo que cada sub-canal utiliza uma seqüência **PN** distinta. Através desta técnica, é possível aumentar a taxa de transmissão, sem aumentar a largura de banda necessária.

Del Re et al.[18] estabelecem uma comparação entre as técnicas CDMA e OFDM, utilizadas para a transmissão de dados através da rede elétrica. A análise comparativa entre as duas técnicas é feita considerando a transmissão de bits em paralelo através de sub-canais, com objetivo de aumentar a taxa total de transmissão.

Um apanhado geral sobre o estado da arte da transmissão de dados através da rede elétrica é feito por Pavlidou et al.[19], onde é enfatizada a vantagem da utilização de técnicas de espalhamento de espectro, no que diz respeito à robustez contra interferências e à capacidade de múltiplo acesso, além de abordar o controle de acesso ao canal de comunicação, bem como os protocolos de comunicação utilizados na rede elétrica.

### 3.2 Configuração proposta para a LAN

Neste trabalho é proposta uma configuração alternativa para comunicação através da rede elétrica utilizando CDMA, que permita a implementação de uma rede local “*peer-to-peer*”, possibilitando o compartilhamento simultâneo do canal de comunicação pelos usuários participantes.

A rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão, pode ser dividida em várias sub-redes:

- Uma sub-rede externa, que é de responsabilidade da concessionária do serviço, que vai da saída do transformador até a entrada de serviço dos consumidores. Esta sub-rede poderá ser utilizada pela concessionária, para implantação de serviços inerentes à prestação do serviço;
- Diversas sub-redes internas, que são de responsabilidade dos consumidores, compostas pela parte da rede a partir da entrada individual de serviço. A rede interna pode ser de uma residência individual, de um apartamento em um prédio residencial, de um escritório ou um conjunto de escritórios em um prédio comercial ou de uma indústria em uma instalação industrial.

A configuração proposta para a LAN, pode ser implementada em cada uma das sub-redes individualmente. De modo a isolar a sub-rede externa da interna, evitando interferências, poderão ser definidas faixas de frequência diferenciadas, bem como códigos de espalhamento diferentes para a sub-rede externa e interna. Quanto à interferência entre as redes internas, trabalhando com frequências mais elevadas, os componentes da entrada de serviço do consumidor como os disjuntores e medidores, atuariam como um filtro para estas altas frequências, eliminando parte do sinal que eventualmente transite entre uma sub-rede e outra. O sinal que passar de uma sub-rede para outra será percebido como ruído.

Na figura 3.1, é mostrado o diagrama esquemático representativo de uma rede de distribuição de baixa tensão, onde podem ser identificadas a sub-rede externa e as sub-redes internas.

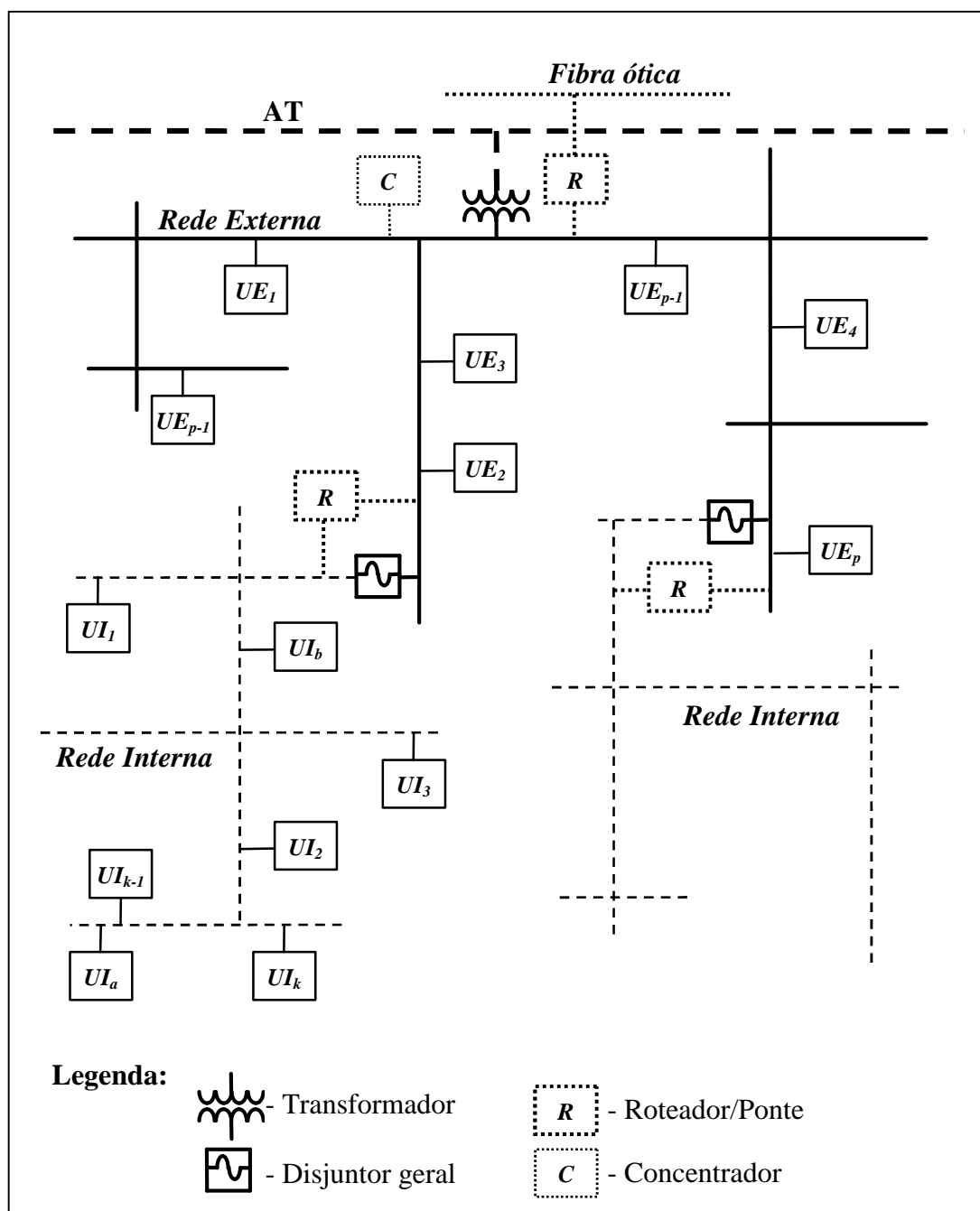


Figura 3.1 - Configuração proposta para uma LAN sobre a rede elétrica

Na configuração proposta para a LAN na rede interna, existem  $k$  usuários (*unidades*) participantes conectados a cada uma das sub-redes, onde cada unidade possui um código de espalhamento de espectro ( $PN$ ) específico. Além disso, para cada uma das sub-redes existe um canal de uso comum, utilizando um código de espalhamento de uso comum, conhecido por todas as unidades participantes daquela sub-rede.

Cada unidade específica tem condições de recuperar os dados a ela endereçados que estão trafegando pela rede, utilizando para isto seu próprio código de espalhamento. Da mesma forma, cada unidade pode recuperar os dados de uso comum, que são enviados à rede através de mensagens do tipo *broadcast*, que são dirigidas a todas as unidades simultaneamente.

Através desta configuração, para que a unidade  $a$  possa enviar uma mensagem para a unidade  $b$ , deve inicialmente enviar uma requisição do tipo *broadcast*, fornecendo o endereço lógico da unidade de destino desejada ( $b$ ), além do código de espalhamento da unidade de origem ( $a$ ). Esta mensagem é enviada a todas as unidades, utilizando o código de espalhamento de uso comum. A unidade de destino, que fica continuamente monitorando a linha através do código comum, detecta esta solicitação e, se não estiver ocupada, retorna uma resposta à unidade solicitante —utilizando o código de espalhamento de espectro da unidade solicitante que veio com a mensagem— informando qual é seu próprio código de espalhamento.

A partir deste procedimento, é estabelecido um canal de comunicação exclusivo (*ponto a ponto*) entre as unidades  $a$  e  $b$ , sendo que cada uma das unidades transmite os dados utilizando o código de espalhamento da outra e recebe dados utilizando seu próprio código.

Por outro lado, na rede externa existem  $p$  unidades mais um concentrador ( $C$ ), conectados à rede, sendo que, cada unidade possui um código de espalhamento específico. Cada unidade conhece o seu próprio código de espalhamento, assim como o código de espalhamento do concentrador. Através do seu próprio código de espalhamento, cada unidade pode recuperar os dados a ela endereçados.

O concentrador por sua vez, conhece o código de todas as demais unidades da rede, estando habilitado portanto, a enviar dados para qualquer unidade bem como receber dados originados em qualquer uma das unidades. Nesta configuração, não há necessidade da troca de mensagens entre duas unidades quaisquer da rede. As trocas de mensagens ocorrem somente entre o concentrador e cada uma das unidades. Numa mensagem do concentrador para uma unidade, é utilizado o código de espalhamento desta unidade e, numa mensagem da unidade para o concentrador é utilizado o código de espalhamento do concentrador.

A eventual necessidade de comunicação entre unidades pertencentes à sub-rede interna e externa respectivamente, pode ser feita através de um roteador ou uma ponte(**R**), que seria uma unidade com capacidade de acesso tanto à sub-rede externa quanto à sub-rede interna. Do mesmo modo, poderá haver um roteador ou uma ponte para toda a rede de baixa tensão, de modo a possibilitar o acesso ao mundo externo, através por exemplo, de um cabo de fibra ótica.

Está claro que, todo este procedimento deve estar sujeito às regras de um protocolo específico de acesso ao meio (camada 2), que permita um gerenciamento efetivo do tráfego de mensagens entre as unidades participantes da rede, o que não faz parte do escopo deste trabalho. Pode-se imaginar o uso de protocolos do tipo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect*(CSMA/CD) ou *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*(CSMA/CA) que detecta se o canal está ocupado. A diferença é que o monitoramento da portadora seria realizado pelo monitoramento com o código do canal comum e a verificação de picos de correlação num período superior ao tamanho do código.

Através da configuração proposta, é possível o compartilhamento simultâneo do canal de comunicação —neste caso a rede elétrica— por todas as unidades que estão conectadas à rede, tornando assim a rede elétrica um meio conveniente para implantação de uma LAN.

Apenas o canal de uso comum (*broadcast*) é repartido entre todos os usuários para a transmissão das requisições, havendo neste canal a possibilidade da ocorrência de



colisões. Como as mensagens que trafegarão neste canal deverão ser mensagens curtas, contendo essencialmente o código das estações de origem/destino bem como os respectivos códigos de espalhamento, as colisões que eventualmente ocorram neste canal comum não deverão trazer impacto significativo sobre a performance do sistema como um todo.

## Capítulo 4: Metodologia utilizada nas simulações

### 4.1 Conceituação do CDMA

O CDMA é um método de acesso múltiplo a um canal de comunicação, que utiliza técnicas de espalhamento de espectro. Uma destas técnicas é o espalhamento de espectro por sequência direta (DS/SS). Como já foi visto, no espalhamento de espectro por sequência direta, o sinal binário original, de banda estreita, é espalhado por meio de um código de espalhamento (sequência *PN*), resultando em um sinal de banda larga, com baixa densidade espectral de potência. Este sinal espalhado aparece como ruído para um receptor qualquer, que não conhece o código de espalhamento. Este conceito é utilizado no CDMA, onde existe um determinado número de usuários compartilhando a mesma faixa de frequência. O sinal que foi espalhado através de um código de espalhamento específico, só pode ser recebido pelo usuário que conhece o código. Os demais usuários não têm condições de decodificar este sinal. A técnica CDMA é atualmente muito utilizada nas comunicações sem fio, principalmente em sistemas de comunicação via satélite e telefonia celular.

Considerando que, o sinal destinado a um usuário aparece como ruído para os demais usuários, fica claro que existe uma interferência mútua, quando temos dois ou mais usuários compartilhando a mesma faixa de frequência. Este tipo de interferência é denominado *Interferência de Múltiplo Acesso* (MAI), que limita a quantidade de usuários que podem compartilhar simultaneamente a mesma faixa de frequência no canal de comunicação.

Outra característica do CDMA, diz respeito à natureza assíncrona do processo, ou seja, cada usuário possui sua própria referência de tempo para a transmissão dos sinais, o que caracteriza a necessidade de um processo de sincronização para a recepção do sinal por parte do destinatário da mensagem.

## 4.2 Configuração CDMA analisada

O principal objetivo deste trabalho, é a avaliação do compartilhamento da rede elétrica simultaneamente por diversos usuários, para a transmissão digital de dados, utilizando o CDMA.

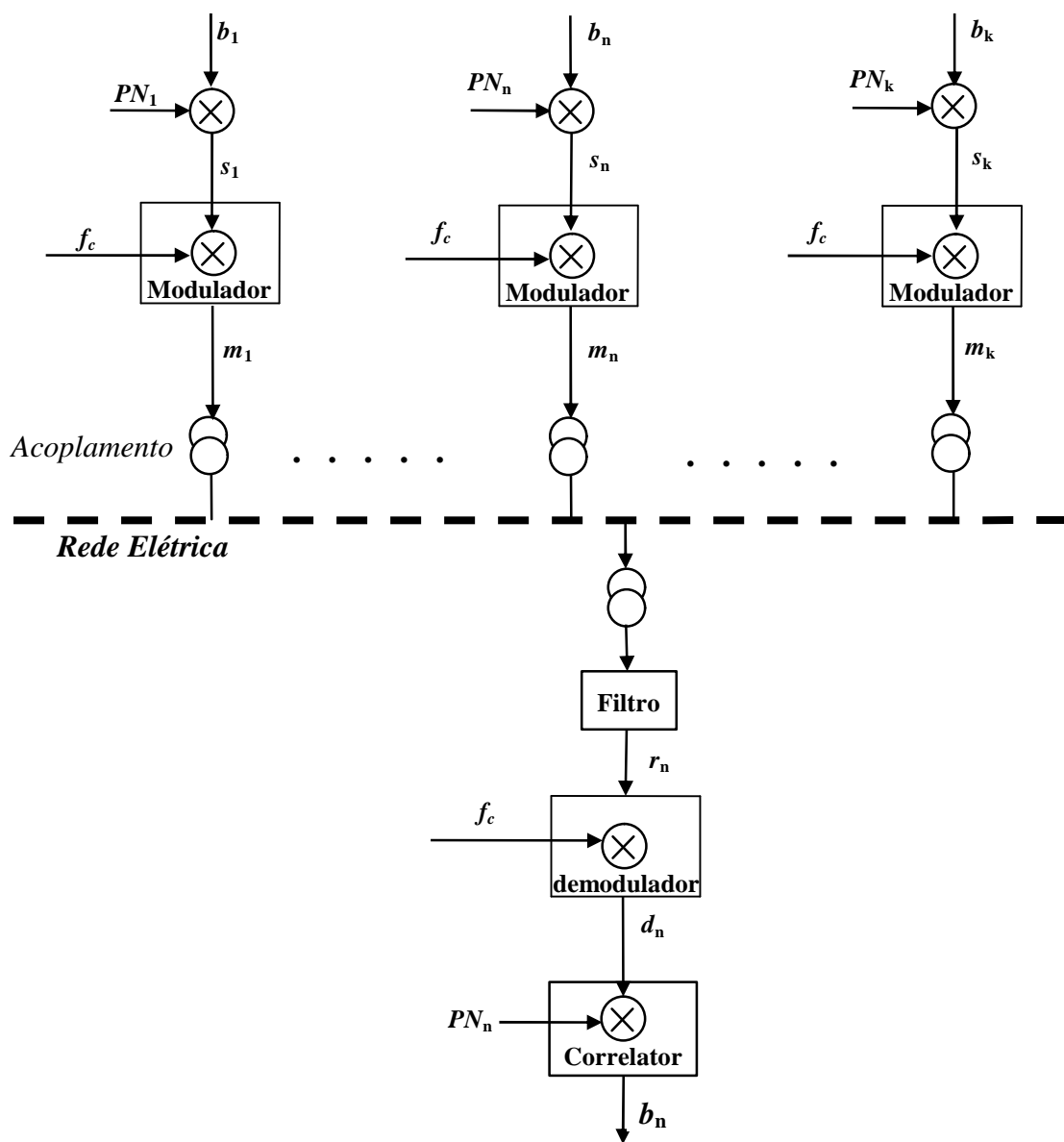


Figura 4.1 - Configuração CDMA utilizada nas simulações

O diagrama esquemático do modelo proposto que foi utilizado nas simulações visando à implementação da configuração de rede proposta no capítulo anterior, está mostrado na figura 4.1. Neste esquema, existe um número  $k$  de usuários utilizando a rede elétrica para a transmissão de dados digitais, todos eles compartilhando a mesma largura de banda.

$b_n(t)$  é o sinal binário a ser transmitido por um usuário qualquer  $n$ , com uma taxa de transmissão de bits  $R_b$ , sendo  $R_b = 1/T_b$ , onde  $T_b$  é a duração de um bit.

O espectro deste sinal binário  $b_n(t)$ , é espalhado, através da multiplicação do sinal pelo código  $PN_n(t)$ , de comprimento  $N$  e taxa de chips  $R_c$ , sendo  $R_c = 1/T_c$ , onde  $T_c$  é a duração de um chip. Como resultado, é obtido o sinal de banda larga  $s_n(t)$ .

$$s_n(t) = b_n(t) \cdot PN_n(t) \quad (13)$$

O sinal com espectro espalhado  $s_n(t)$  é modulado em fase através da portadora  $A \cdot \cos(2\pi f_c t + ?)$ , resultando no sinal modulado  $m_n(t)$ , que será transmitido através da rede elétrica.

$$m_n(t) = b_n(t) PN_n(t) \cdot A \times \cos(2\pi f_c t + ?) \quad (14)$$

No canal de comunicação, —no caso a rede elétrica— são adicionados ruído e interferência, representados por  $n_n(t)$ .

Assim, o sinal recebido pelo receptor é,

$$r_n(t) = m_n(t) + n_n(t) \quad (15)$$

No receptor, o sinal recebido —que é a soma dos sinais transmitidos pelos  $k$  usuários, mais o ruído e interferências— deve inicialmente, passar por um processo de sincronização, de modo a sincronizar o sinal com o tempo da transmissão. Após a sincronização, o sinal é demodulado, obtendo-se o sinal binário  $d_n(t)$ .

O sinal demodulado  $d_n(t)$  passa a seguir pelo processo de “desespalhamento”, ou seja, é multiplicado novamente pelo mesmo código utilizado no espalhamento, a partir do qual o sinal binário é recuperado. Cada usuário recupera os dados a ele endereçados, utilizando para isto, o seu código específico de espalhamento.

O “desespalhamento” e a conseqüente recuperação do sinal binário, são feitos pelo correlator, que pode ser implementado utilizando um filtro FIR para recuperar os bits do sinal recebido.

Porém, a taxa máxima de transmissão que pode ser obtida, depende da largura de banda disponível para utilização na rede elétrica. Considerando a modulação BPSK, que foi utilizada nas simulações, a taxa máxima de transmissão para um código de comprimento  $N$  é  $R = B/N$ , sendo  $B$  a largura de banda.

#### 4.2.1 O correlator

Conforme foi mostrado na figura 4.1, a operação de “desespalhamento”, bem como a decisão sobre o bit recebido é realizada pelo correlator. A arquitetura do correlator é composta por um filtro FIR, sendo que, os coeficientes do filtro são os valores da seqüência **PN** na ordem inversa, conforme mostrado na figura 4.2.

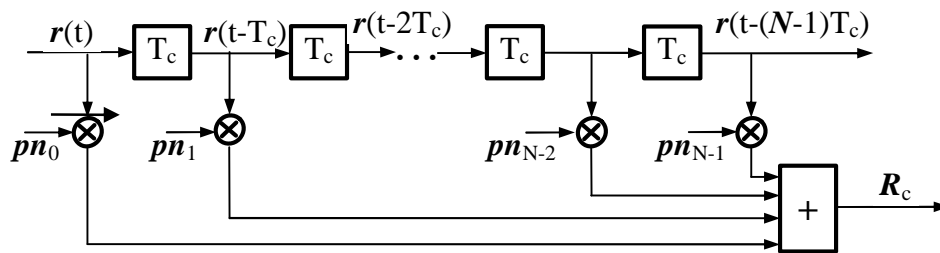


Figura 4.2 - O correlator como um filtro FIR

A saída do filtro mostrado na figura 4.2, é a convolução do sinal recebido  $r(t)$  com a seqüência **PN** na ordem inversa, que representa a correlação do sinal recebido com a seqüência **PN**, dada pela equação:

$$R_c = \sum_{i=0}^{N-1} r(t - i \cdot T_c) \cdot pn_{N-1-i} \quad (16)$$

Na figura 4.3, é mostrado o valor da correlação, obtida na saída do filtro FIR, para uma seqüência **PN** de comprimento  $N = 15$ . Um pico máximo no valor da correlação indica que um valor correto está sendo recebido, além de indicar a sincronização do sinal recebido com a seqüência **PN**.

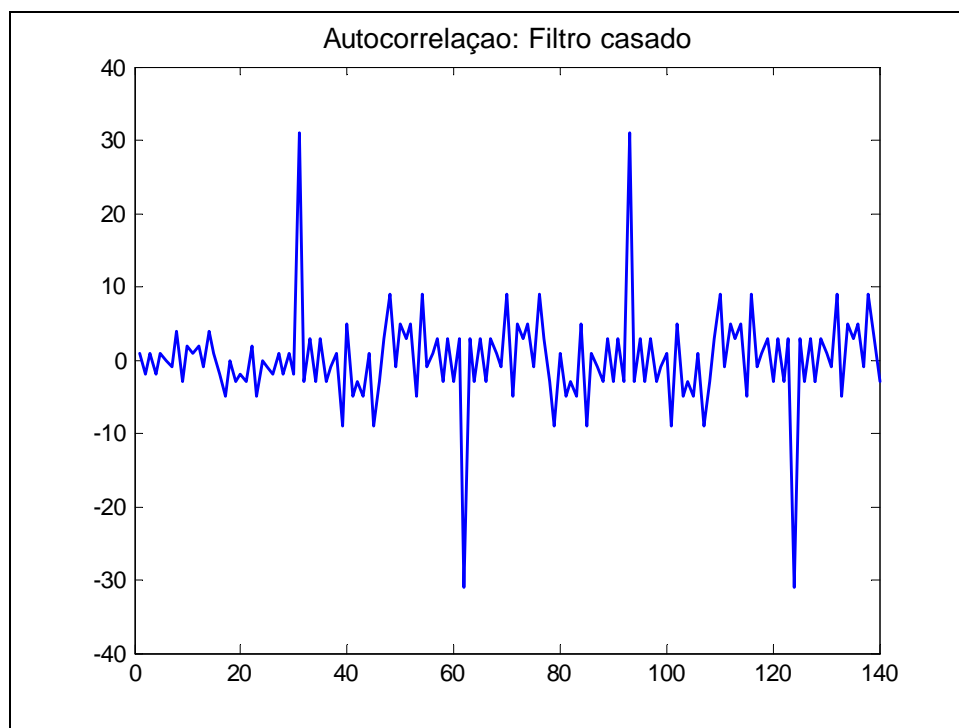


Figura 4.3 - Valor da correlação, obtido na saída do filtro FIR, para uma sequência de comprimento  $N = 31$ .

A polaridade do pico máximo da correlação indica o valor do bit recebido. Se este valor for positivo, a decisão é pelo bit 1 e se for negativo, a decisão é pelo bit 0.

### 4.3 A sincronização através da correlação

Em um sistema de múltiplo acesso utilizando CDMA, a transmissão dos dados pelos diversos usuários participantes da rede, é feita de forma totalmente assíncrona, onde cada um dos usuários possui uma referência de tempo distinta. Para que a recuperação do sinal por parte do receptor seja possível, é necessário que exista um sincronismo entre o sinal recebido e o código de espalhamento gerado localmente pelo usuário destinatário, de modo que as operações de demodulação e desespalhamento possam ser efetuadas corretamente.

Este processo de sincronização é feito através da correlação do sinal recebido com a sequência **PN** gerada localmente. Quando o valor da correlação atinge seu ponto máximo, significa que o sinal recebido e a sequência **PN** gerada localmente no receptor, estão sincronizados.

A figura 4.4 mostra o valor da correlação obtida nas simulações, para uma sequência **Gold** de comprimento  $N = 127$ . Como pode ser observado, existe uma definição bem clara do início de cada bit do sinal binário recebido, o que mostra a adequabilidade das sequências **Gold**, para a sincronização entre o sinal recebido e a sequência **PN**.

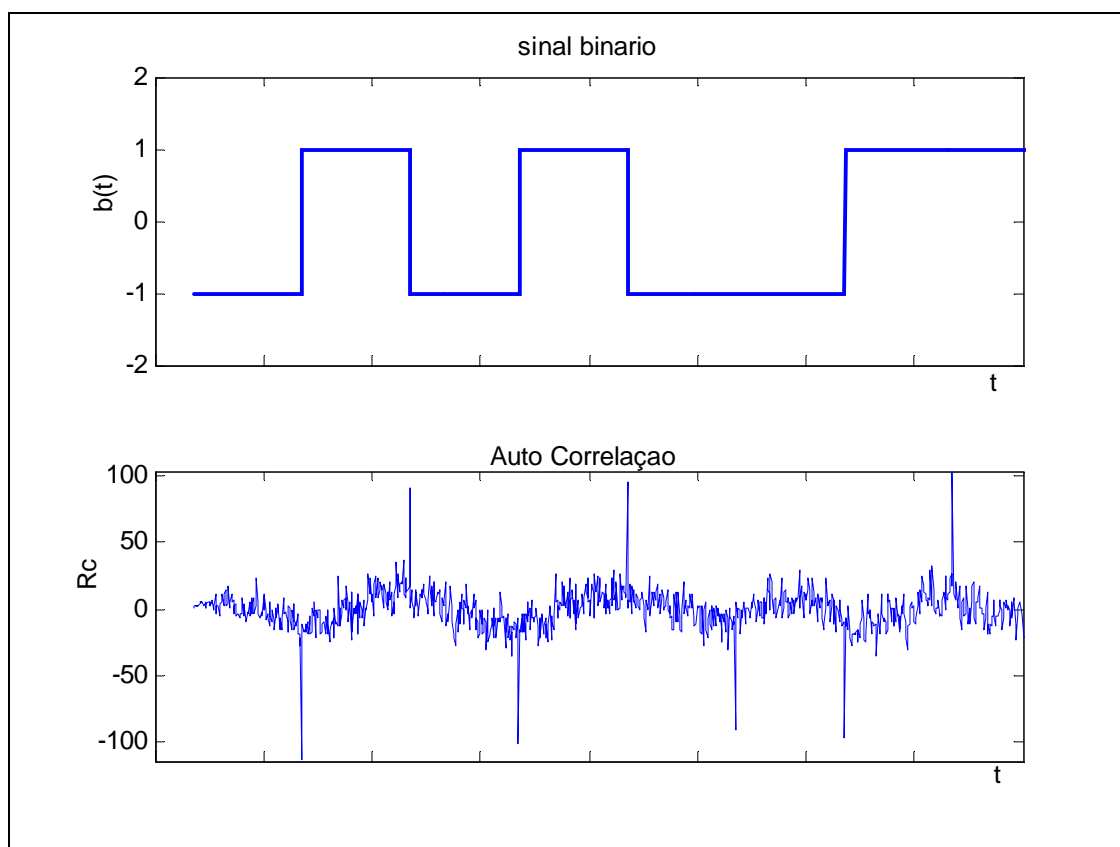


Figura 4.4 – Sincronização através da correlação, para uma sequência Gold de comprimento  $N = 127$



#### **4.4 Considerações sobre o ruído na rede elétrica**

A modelagem teórica de um sistema para avaliar o comportamento da técnica CDMA em um canal de comunicação sujeito ao ruído branco (gaussiano) é conhecido na literatura [11], [12]. No entanto, para um sistema de comunicação de dados através da rede elétrica isto ainda representa um desafio, pois a mesma sofre mudanças bruscas em suas características, como alterações na impedância, em função da frequência, da topologia da rede e de cargas sendo ligadas e desligadas. Alguns modelos foram propostos, para caracterização da rede, no que diz respeito à impedância, fontes de ruído e níveis de atenuação. Apesar disto, não existe ainda um modelo que represente o canal de comunicação de maneira adequada, e que seja aceito como definitivo [1], [9].

Trabalhos pesquisados na literatura [1], [9], mostraram que a impedância da rede de distribuição de energia em uma edificação possui grandes variações em função da frequência e da localização.

Na figura 4.5 é mostrado o gráfico apresentado por Radford[1], com valores medidos de impedância da rede elétrica em função da frequência.

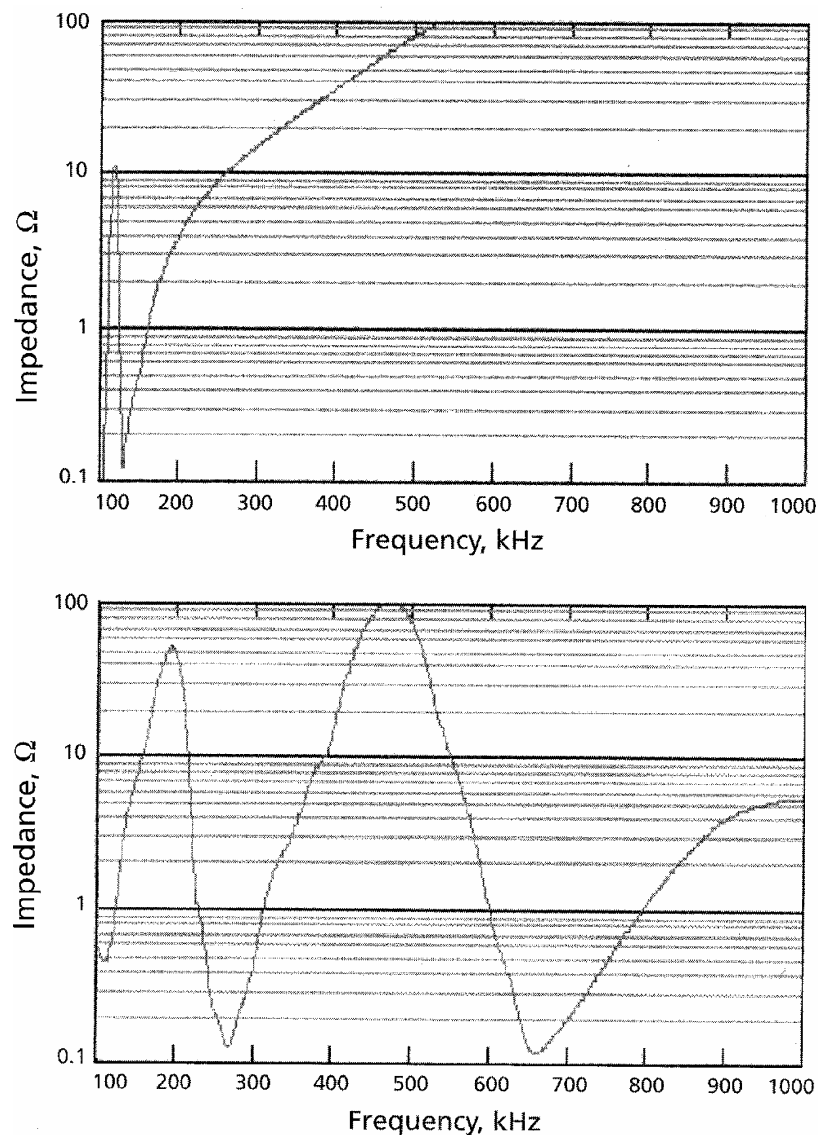


Fig. 4.5 - Impedância da rede elétrica, em função da frequência e da topologia, obtida por Radford[1]

Os dois gráficos da figura 4.5 mostram os valores de impedância na rede elétrica, medidos em dois pontos próximos dentro da mesma edificação. Como pode ser observado, existem diferenças significativas nos valores da impedância em função da frequência e do local onde as medições foram feitas (topologia).

Outra característica da rede elétrica, quando utilizada como canal de comunicação, diz respeito aos diferentes níveis de atenuação do sinal em função da frequência.

Na figura 4.6, é mostrado o gráfico da resposta em frequência da rede elétrica, obtidos por Hensen e Schulz[16] através de medições realizadas na rede elétrica de baixa tensão (230V).

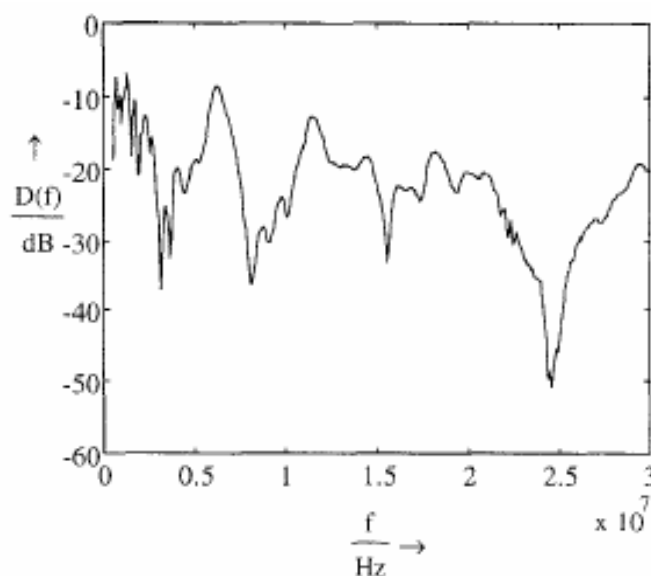


Fig 4.6 - Resposta em frequência da rede elétrica observada em medições realizadas por Hansen&Schulz[16]

Neste gráfico está representada uma de 361 medições realizadas na rede de baixa tensão de um dos edifícios do campus da universidade. As medições foram efetuadas em um período de 18 horas, a cada 3 minutos. É possível observar a variação da resposta em frequência da rede elétrica, com uma acentuada atenuação do sinal na faixa de 25MHz.

Na figura 4.7, é mostrado o gráfico da resposta em frequência da rede elétrica, obtido por Hachem e outros[17], em medições efetuadas na faixa de 0 a 30 MHz. Neste gráfico, também pode-se observar uma atenuação acentuada do sinal em torno de 21MHz.

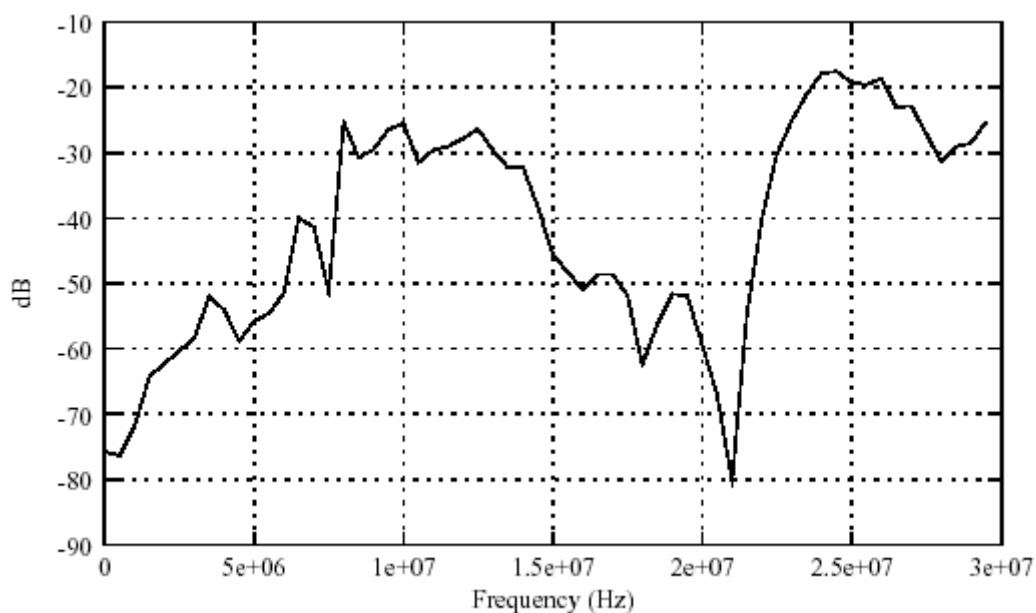


Fig 4.7 - Resposta em frequência da rede elétrica, observadas em medições realizadas por Hachem e outros[17]

Além das alterações bruscas na impedância e nos níveis de atenuação vistos anteriormente, a rede elétrica está sujeita a uma diversidade de fontes de ruído, que podem ser caracterizados como: ruído colorido de fundo, interferências de banda estreita, ruídos impulsivos periódicos e ruídos impulsivos aleatórios.

Na figura 4.8, são mostrados gráficos com amostras de ruídos gerados por vários tipos de dispositivos conectados à rede elétrica, obtidos por Abad e outros[20].

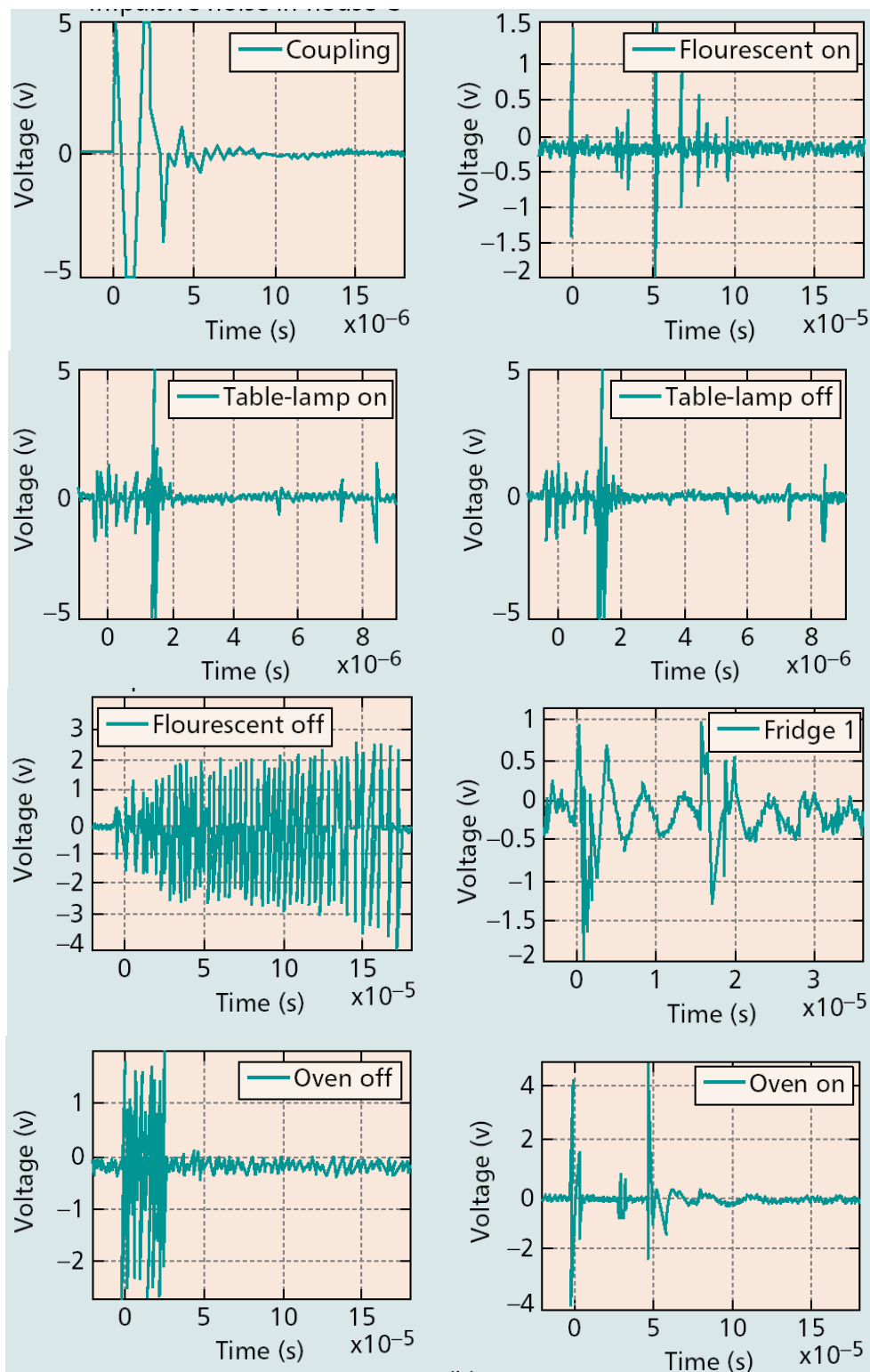


Fig. 4.8 – Tipos de ruídos gerados por dispositivos ligados à rede elétrica, observados em medições por Abad e outros[20]

No desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas diversas baterias de simulações, considerando dois tipos de abordagem: inicialmente, foi considerado um canal de comunicação com ruído branco (AWGN) e, posteriormente, foram realizadas as mesmas simulações utilizando conjuntos de amostras de ruído obtidos através de medições na rede elétrica.

Para as simulações foram utilizados três conjuntos de amostras de ruído medidos na rede elétrica do laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica:

- Conjunto de 60.000 amostras medidas com um kit DSP da Texas (conversor analógico-digital de 12 bits), frequência de amostragem  $f_s=40\text{kHz}$ , sendo utilizados um filtro passa-altas com frequência de corte em 200 Hz;
- Conjunto de 60.000 amostras medidas com uma placa National (conversor analógico-digital de 16 bits), frequência de amostragem  $f_s=200\text{kHz}$ ;
- Conjunto de  $24 \cdot 10^6$  amostras adquiridas com uma frequência de amostragem  $f_s=200\text{kHz}$ .

Na figura 4.9 (a) está plotado um intervalo de 0,05s de amostras de ruído medido na rede elétrica ( $f_s = 200$  kHz), e na figura 4.9(b) está mostrada a densidade espectral dos três conjuntos de amostras de ruído medido na rede elétrica, que foram utilizados nas simulações.

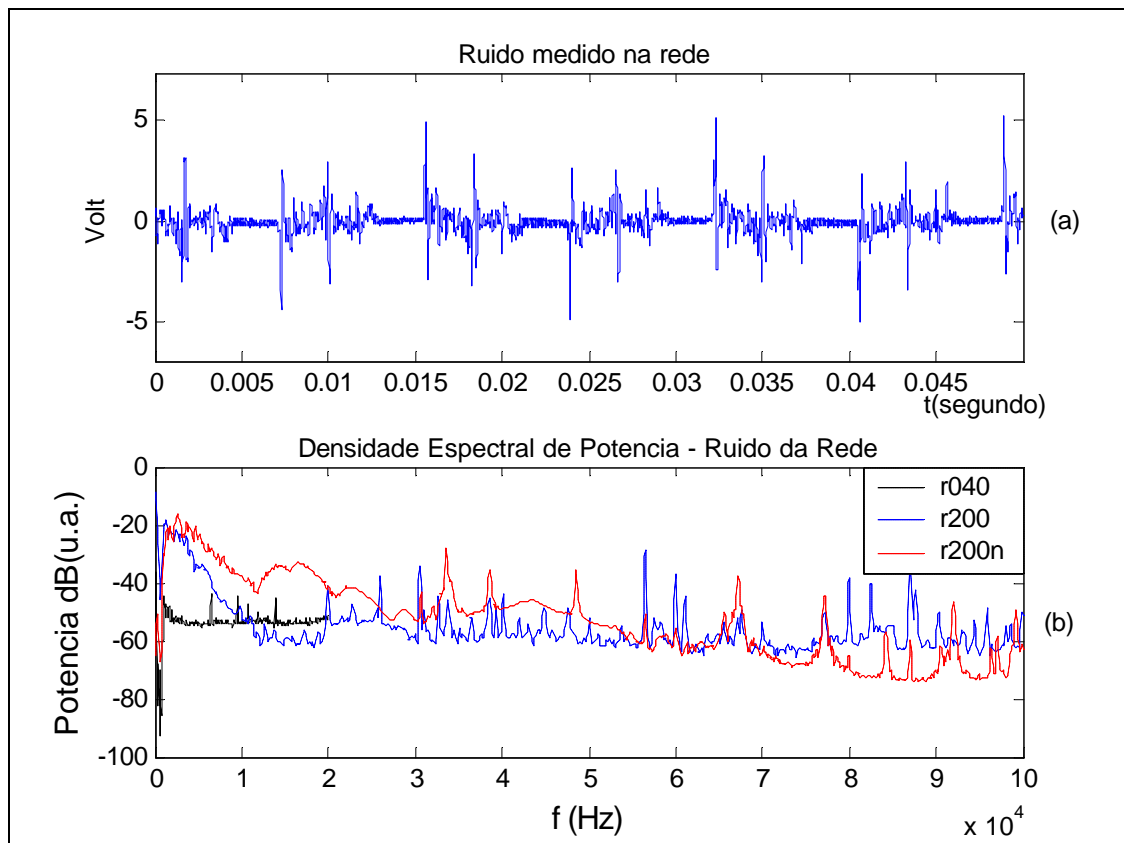


Figura 4.9 – Ruído medido na rede elétrica (amostra r200n) e Densidade Espectral dos três conjuntos de amostras de ruído medido.

#### 4.5 Modelo da metodologia utilizada

As simulações visando a observação das taxas de erro de bits, foram realizadas utilizando o software Matlab<sup>®</sup> 6.5, tendo como base o modelo cujo diagrama esquemático está mostrado na figura 4.10.

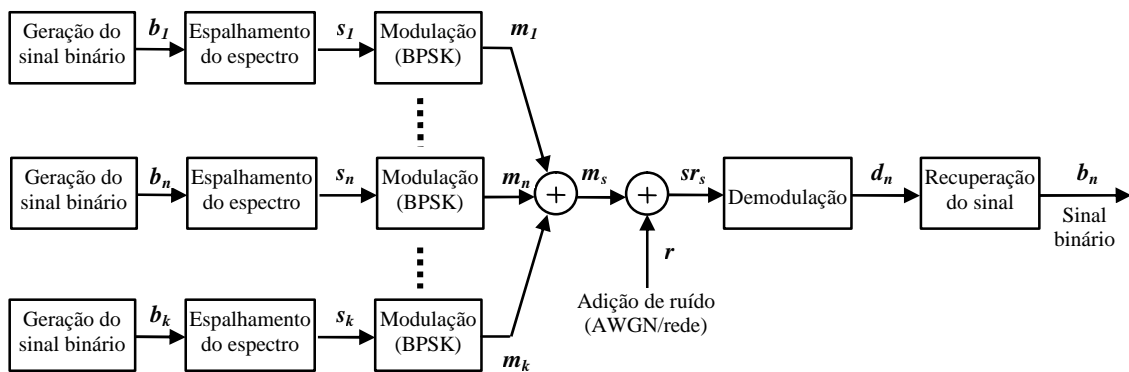


Figura 4.10 - Modelo utilizado para as simulações

No processo de simulação, inicialmente é gerado um sinal binário aleatório ( $b_x$ ) para cada um dos usuários que faz parte do conjunto a ser simulado. As simulações foram efetuadas a partir de blocos de bits gerados aleatoriamente, em quantidade suficiente para que um determinado número de erros seja atingido. O sinal binário correspondente a cada um dos usuários, é então espalhado através da multiplicação, bit a bit, pelo código de espalhamento respectivo, obtendo-se um novo sinal binário ( $s_x$ ), cujo comprimento é  $N$  vezes o comprimento do sinal binário original. A seguir, cada um dos sinais espalhados é modulado, através de modulação BPSK, obtendo-se o sinal ( $m_x$ ). Para a modulação, foi utilizada a função `dmod` do Matlab. Os sinais modulados, correspondentes a cada um dos usuários, são então somados, obtendo-se o sinal ( $m_s$ ), que será transmitido pela rede elétrica. A este sinal transmitido é adicionado um ruído ( $r$ ), que pode ser o ruído branco ou o ruído medido na rede.



Na etapa de adição do ruído ao sinal transmitido, um fator importante a ser considerado é a relação sinal ruído (SNR), definida como sendo a relação entre a potência do sinal total recebido e a potência do ruído, mostrado na equação (17).

$$SNR = \frac{P_s}{P_r} \quad (17)$$

Em dB, a relação sinal ruído  ,

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_s}{P_r}\right) \quad (18)$$

Para a simulação considerando o canal com ruído branco, a adição do ruído é feita através da função AWGN do Matlab, que calcula qual é a potência do ruído necessária, de modo a se obter a relação sinal ruído desejada. No caso da simulação com o ruído medido na rede, a potência deste ruído deve ser ajustada, de forma que a relação sinal ruído desejada seja alcançada. Para este ajuste, a potência do ruído deve ser multiplicada por um coeficiente ( $a$ ), que pode ser obtido através da equação (19).

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_s}{a^2 P_r}\right) \quad (19)$$

Assim,

$$10^{\frac{SNR_{dB}}{10}} = \frac{P_s}{a^2 P_r} \quad (20)$$

Portanto,

$$a = \sqrt{\frac{P_s}{P_r \cdot 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}}}} \quad (21)$$

Desta forma, na simulação é adicionado ruído ao sinal, para cada valor da relação sinal ruído a ser considerada. Como os gráficos apresentados com os resultados das simulações são normalizados em relação    $E_b/N_0$ , foi utilizada a equação (22), para a conversão da relação sinal ruído (SNR) para  $E_b/N_0$  [11].

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \cdot (BT_b) \quad (22)$$

onde,

$B$  é a largura de banda do sinal e

$T_b$  é o tempo de duração do bit.

Como a largura de banda do sinal espalhado é  $1/T_c$ , tem-se:

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \cdot \left(\frac{T_b}{T_c}\right) = SNR \cdot N \quad (23)$$

No lado do receptor, para a recuperação do sinal correspondente à um usuário  $n$  qualquer, o sinal recebido ( $sr_s$ ) ? que é a soma dos sinais mais o ruído adicionado? é demodulado, através da função `ddemod` do Matlab. Obtendo-se o sinal binário ( $d_n$ ), que é o sinal do usuário  $n$  com o espectro espalhado. Este sinal espalhado é filtrado, através de um filtro FIR cujos coeficientes são valores do código de espalhamento na ordem inversa. A saída deste filtro é o valor da correlação, a partir da qual é tomada a decisão sobre o bit recebido. Se o valor da correlação for positivo, a decisão é pelo bit 1 e se for negativo a decisão é pelo bit 0. Se o valor da correlação for zero, a decisão pelo bit recebido é aleatória.

O cálculo da taxa de erro de bits correspondente a um usuário  $n$  qualquer, para cada um dos valores da relação sinal ruído simulados, é feito através da comparação entre o sinal binário gerado pelo usuário  $n$  e o sinal binário recuperado, através do código de espalhamento do usuário considerado.

## Capítulo 5: Resultados

Neste capítulo, são feitas considerações sobre os resultados experimentais obtidos nas simulações realizadas durante o desenvolvimento do trabalho. As simulações efetuadas tiveram como principal objetivo, investigar qual o número de usuários que podem compartilhar simultaneamente o canal de comunicação, mantendo a taxa de erro de bits(BER) dentro de parâmetros aceitáveis, visando a implantação de uma LAN sobre a rede elétrica.

As simulações foram efetuadas considerando modulação BPSK, inicialmente para um canal de comunicação sujeito ao ruído gaussiano(AWGN) e posteriormente, para um canal com o ruído medido na rede elétrica, de modo a permitir uma comparação sobre o comportamento do canal nas duas situações.

### 5.1 Comparativo entre a teoria e os resultados das simulações

Numa primeira etapa do trabalho, foram realizadas simulações para validação do modelo teórico utilizado, visando comparar os resultados da metodologia utilizada com os valores teóricos, disponíveis na literatura.

A taxa de erro teórica, considerando a modulação BPSK —sem espalhamento de espectro— é dada pela equação [11]:

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (24)$$

onde:

$P_b$  é a probabilidade de erro,

$E_b$  é a energia de um bit,

$N_0$  é a densidade espectral do ruído

Na figura 5.1 é apresentado o gráfico comparativo entre a taxa de erro de bits teórica, obtida através da equação (24), e a taxa de erro de bits obtida através das simulações, considerando um canal com ruído branco.

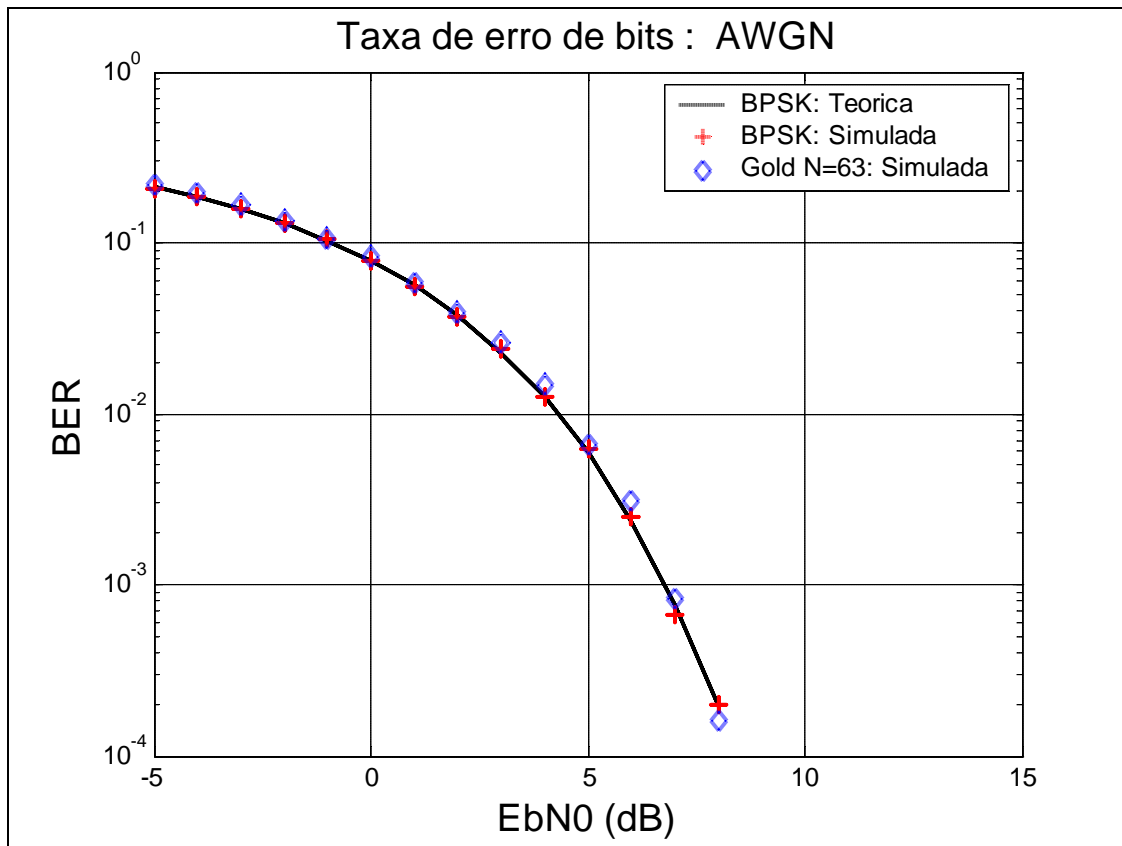


Figura 5.1 - Comparação entre a taxa de erro teórica e as taxas de erro observadas nas simulações, para 1 usuário

No gráfico da figura 5.1, a linha contínua representa a taxa de erro teórica considerando um usuário e modulação BPSK sem espalhamento de espectro ( $N = 1$ ), calculada através da equação (24). A linha representada com o símbolo (+) corresponde à taxa de erro observada nas simulações para um usuário, sem espalhamento de espectro, enquanto a linha representada pelo o símbolo (à) corresponde à taxa de erro para um usuário e código de espalhamento de comprimento  $N = 63$ . Como pode ser observado através do gráfico, as taxas de erro de bits obtidas através das simulações, são compatíveis com as taxas de erro calculadas através da equação teórica, mostrando desta maneira, a validade do modelo utilizado para as simulações.

Para a validação do modelo CDMA foi utilizada a equação (25), proposta por Lam e Tantarana[11]:

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2 \left( \frac{K-1}{3 \cdot N} + \frac{N_0}{2 \cdot E_b} \right)}} \right) \quad (25)$$

Onde:

$K$  é o número de usuários

$N$  é o comprimento do código de espalhamento

Esta equação considera um modelo genérico aproximado para um sistema de múltiplo acesso assíncrono, utilizando modulação BPSK, sobre um canal de comunicação sujeito ao ruído AWGN. Nesta equação, se considerarmos somente um usuário, ou seja,  $K = 1$ , a expressão é equivalente à equação (24).

Para a validação do modelo multiusuário, foram realizadas 4 séries de simulações utilizando código de espalhamento de comprimento  $N = 63$ , considerando um número de 10 usuários simultâneos. Os resultados obtidos nestas simulações estão apresentados no gráfico da figura 5.2.

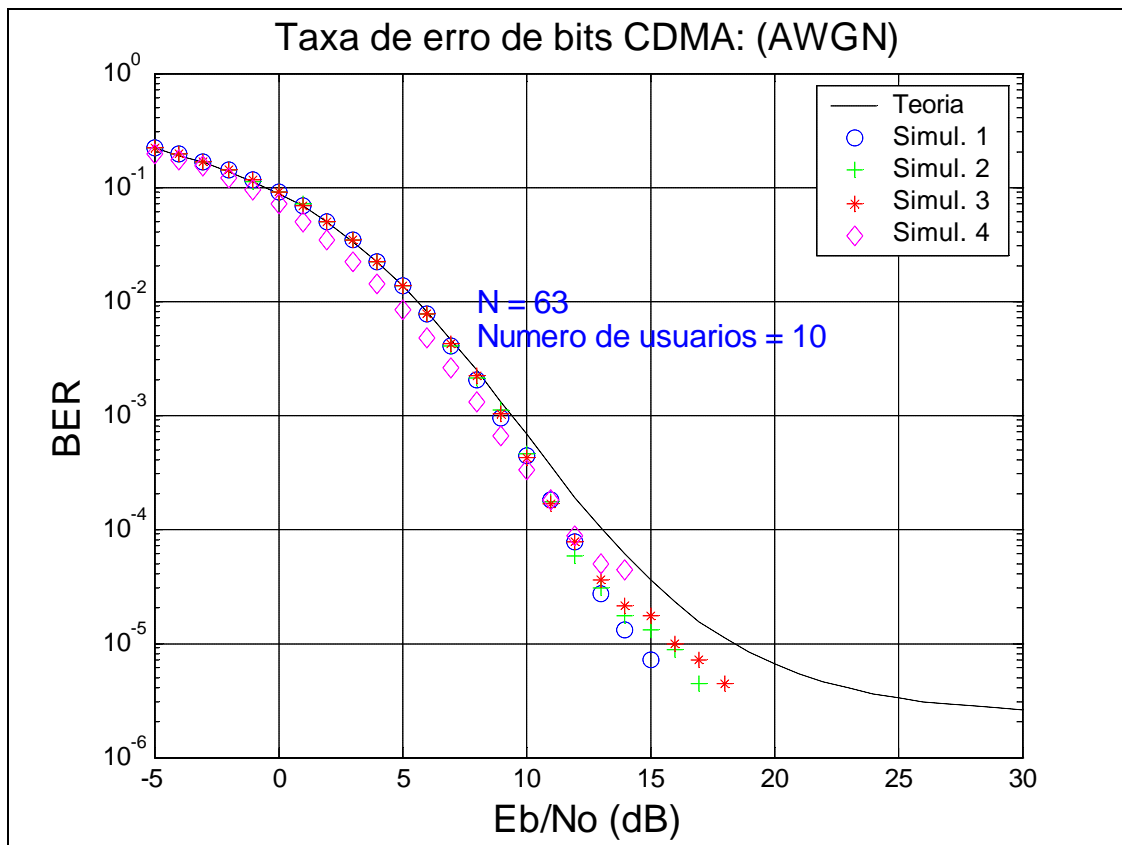


Figura 5.2 - Comparação entre a taxa de erro teórica e as taxas de erro obtidas nas simulações, considerando 10 usuários e código de espalhamento de comprimento  $N = 63$

É possível observar que os resultados obtidos nas simulações são compatíveis com os valores teóricos esperados, calculados a partir da equação (25). Até 10dB os valores teóricos e observados coincidem, havendo um pequeno desvio entre os dois valores a partir deste ponto.

## 5.2 Capacidade para o CDMA

A partir da equação (25) é possível extrair a capacidade teórica para um sistema de múltiplo acesso utilizando o CDMA. Pode-se determinar qual é o número máximo de usuários que podem compartilhar simultaneamente o canal de comunicação, mantendo uma taxa de erro de bits abaixo de um determinado valor.

O gráfico da figura 5.3 foi obtido a partir da equação (25), estabelecendo como  $10^{-4}$  o valor máximo admissível para a taxa de erro de bits.

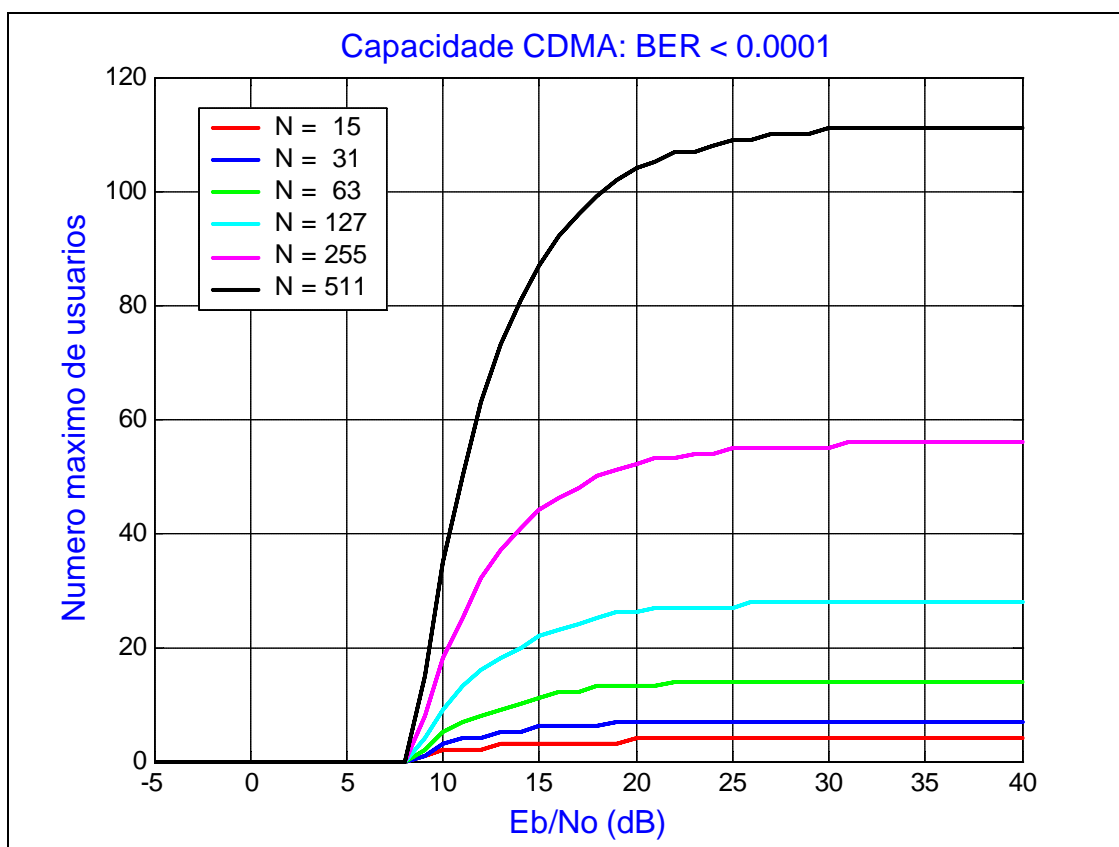


Figura 5.3 – Capacidade teórica do sistema CDMA para um canal sujeito ao ruído AWGN, considerando um erro máximo admissível de  $10^{-4}$

Através do gráfico é possível avaliar qual o número máximo de usuários do sistema, tendo como parâmetros o comprimento do código de espalhamento e a relação  $E_b/N_0$  desejada.

### 5.3 Taxas de erro observadas para CDMA

Conforme apresentado anteriormente, para a realização das simulações, foram utilizadas seqüências **Gold** como código de espalhamento. Foram realizadas diversas baterias de simulações com seqüências **Gold** de comprimento 15, 31, 63 e 127, considerando numa primeira etapa, um canal com ruído branco e numa segunda etapa, um canal com o ruído medido na rede elétrica.

Nos gráficos apresentados mostrando os resultados das simulações, a linha contínua representa a taxa de erro teórica para o canal com ruído branco, enquanto as linhas com marcadores representam as taxas de erro para os três conjuntos de amostras de ruído medidos na rede elétrica, sendo  $k$  o número de transmissões simultâneas sendo realizadas sobre o canal de comunicação.

As taxas de erro de bits apresentadas nos gráficos, são normalizadas em relação à  $E_b/J_0$ , onde  $J_0$  é a densidade espectral de um ruído de banda larga de potência equivalente ao ruído considerado.

No gráfico da figura 5.4 são mostradas as taxas de erro de bits obtidas nas simulações, para um código de espalhamento de comprimento  $N=15$ , considerando um canal com ruído branco e com ruído medido na rede, sobre o qual pode-se observar o seguinte:

- Quanto maior o número de transmissões simultâneas ( $k$ ) maior é a interferência de múltiplo acesso e, conseqüentemente, maior é a taxa de erro de bits;
- As taxas de erro obtidas nas simulações com as amostras de ruído medido na rede, se afastam um pouco das taxas de erro obtidas nas simulações com ruído branco, ficando à direita;

A linha marcada com o símbolo (o) corresponde à taxa de erro para o canal com ruído AWGN, a linha marcada com o símbolo (+) representa a taxa de erro para as amostras de ruído com taxa de amostragem  $f_s = 40$  kHz, enquanto as linhas marcadas com os



símbolos (\* e à) representam as taxas de erro para os dois conjuntos de amostras de ruído com taxa de amostragem de 200kHz.

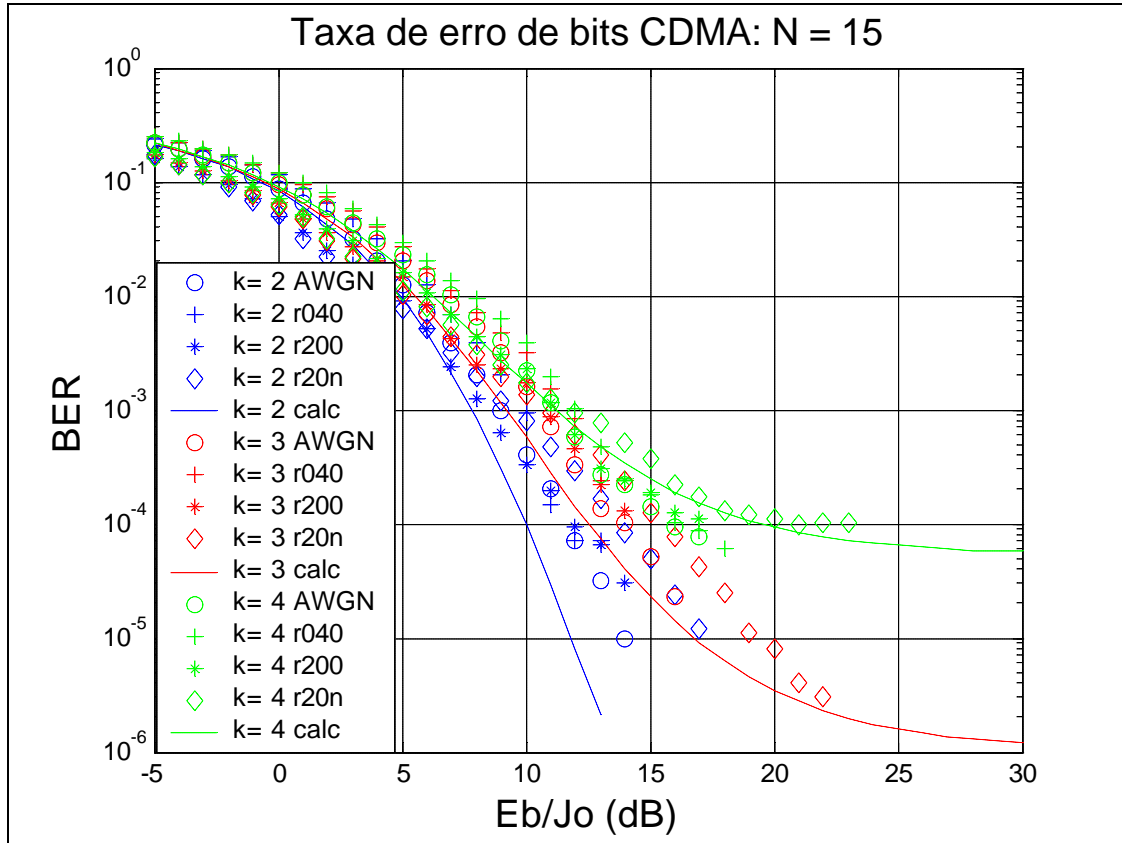


Figura 5.4 - Taxa de erro de bits CDMA,  $N = 15$  – canal com ruído AWGN e canal com ruído medido na rede

Uma análise do gráfico da figura 5.4 mostra que, a partir de 4 transmissões simultâneas, a taxa de erro não diminui mesmo com o aumento da relação sinal ruído, indicando que foi atingido o limite de usuários que podem compartilhar simultaneamente o canal, para um código de espalhamento com  $N = 15$ .

Na figura 5.5 são mostradas as taxas de erro obtidas nas simulações, considerando um código de espalhamento de comprimento  $N=31$ .

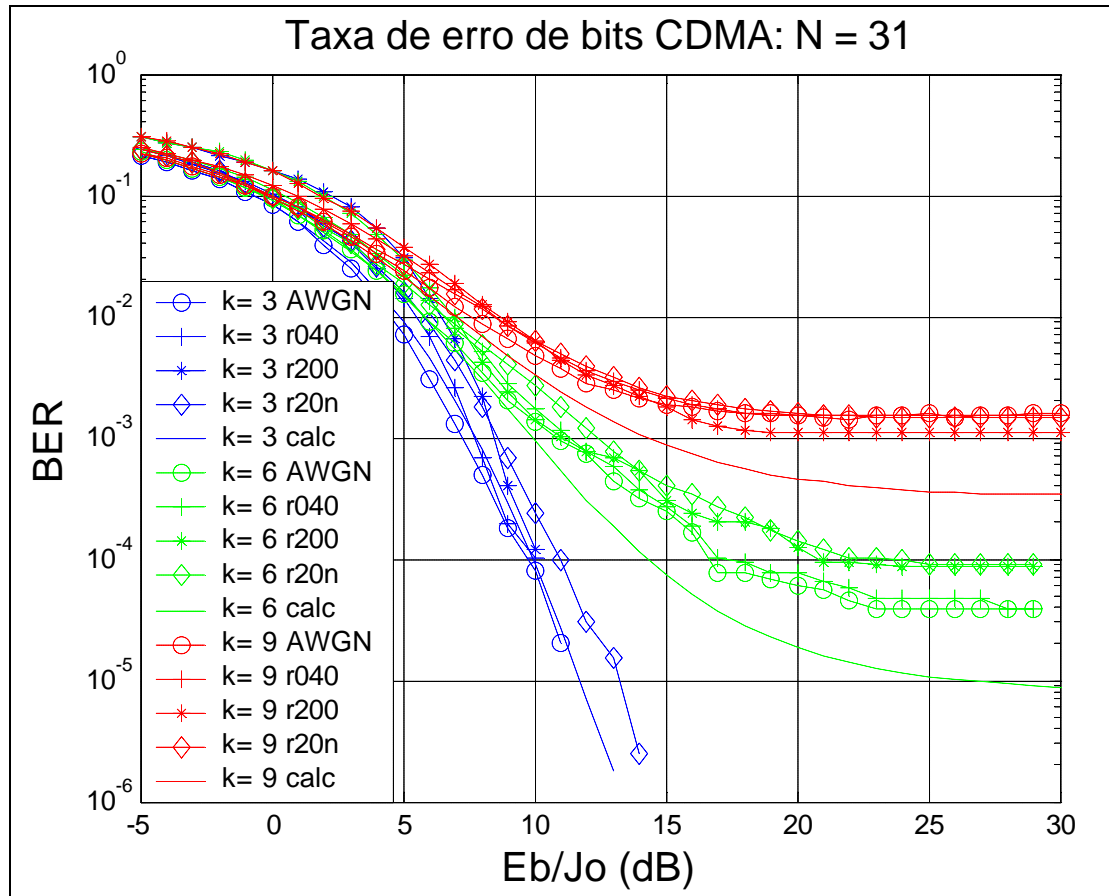


Figura 5.5 - Taxa de erro de bits CDMA,  $N = 31$  – canal com ruído

AWGN e canal com ruído medido na rede

No gráfico da figura 5.5 observa-se que, aceitando-se uma taxa de erro de bits abaixo de  $10^{-4}$ , pode-se observar que, para  $k=3$  é necessária uma relação  $E_b/J_0$  entre 10 e 14 dB, e para  $k = 6$  é necessária uma relação  $E_b/J_0$  acima de 17 dB.

Para uma sequência  $PN$  com  $N = 31$ , é possível observar para mais de 6 transmissões simultâneas, a taxa de erro permanece acima de  $10^{-4}$ , mesmo que se aumente a relação sinal ruído, significando que 6 é o número máximo de transmissões simultâneas para um código de espalhamento de comprimento  $N = 31$  e taxa de erro de bits admissível abaixo de  $10^{-4}$ .

Na figura 5.6, é mostrado o gráfico com as taxas de erro de bits observadas nas simulações, considerando um código de espalhamento de comprimento  $N = 63$ .

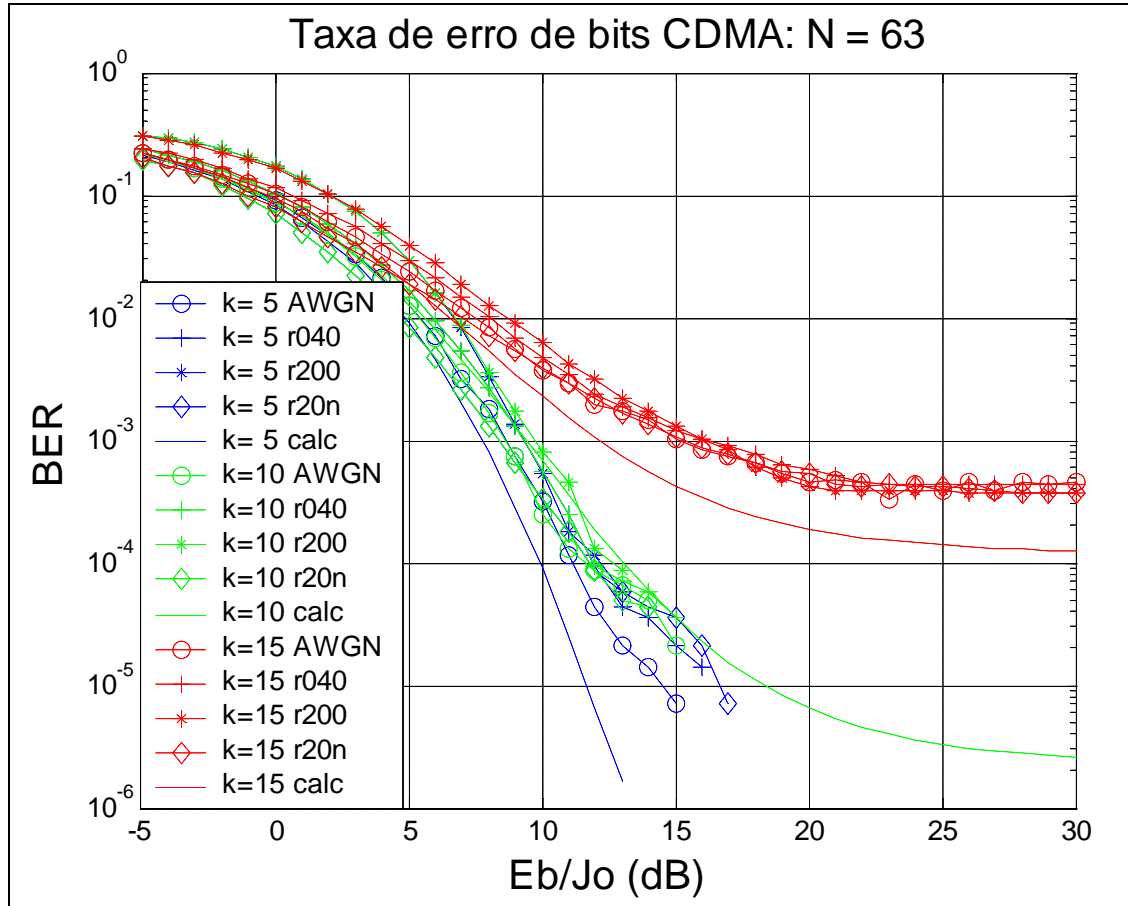


Figura 5.6 - Taxa de erro de bits CDMA,  $N = 63$  – canal com ruído

AWGN e canal com ruído medido na rede

Pode-se observar pelo gráfico que, para uma sequência  $PN$  com  $N = 63$ , tem-se um número abaixo de 15 como limite de transmissões simultâneas para uma taxa de erros admissível de  $10^{-4}$ . Para um número maior de transmissões, a taxa de erro de bits fica acima de  $10^{-4}$ .

No gráfico da figura 5.7 são mostradas as taxas de erro observadas nas simulações, considerando um código de espalhamento de comprimento  $N=127$ .

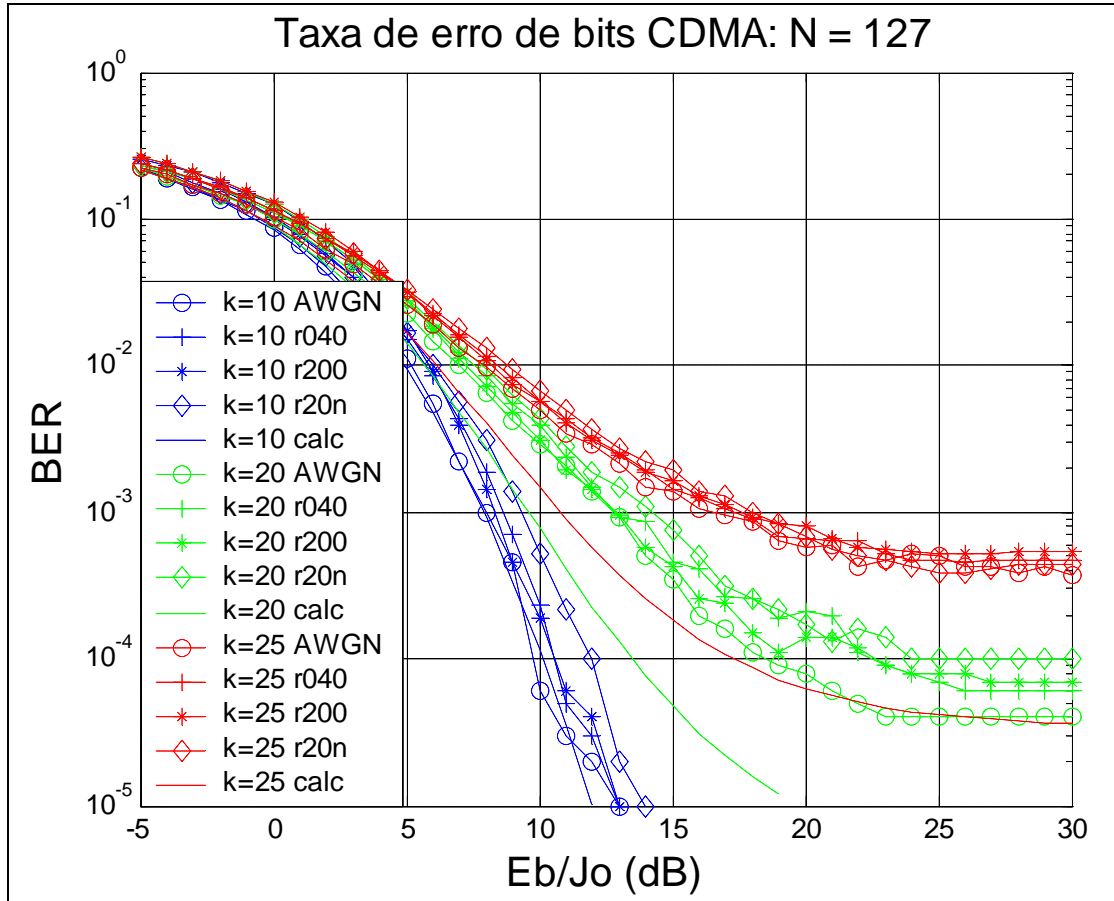


Figura 5.7 - Taxa de erro de bitsCDMA,  $N = 127$  – canal com ruído

AWGN e canal com ruído medido na rede

Pode observar que, para  $k=10$  é necessária uma relação  $E_b/J_0$  entre 10 e 14 dB, para manter a taxa de erro de bits abaixo do valor admissível de  $10^{-4}$ .

Para um código de espalhamento de comprimento  $N = 127$ , tem-se um limite de 21 transmissões simultâneas. Para um número maior de transmissões, a taxa de erro de bits fica acima de  $10^{-4}$ .

Como é possível observar nos gráficos apresentados, as taxas de erro observadas nas simulações para o canal com ruído medido na rede foram maiores do que as taxas de erro para um canal com ruído branco, o que evidencia os cuidados que devem ser tomados para a utilização da rede elétrica como canal de comunicação.

## Capítulo 6: Conclusões

### 6.1 Conclusões

A rede elétrica representa um meio conveniente para a transmissão de dados digitais porém, devido às suas características peculiares, o projeto de sistemas de comunicação utilizando a rede elétrica representa um grande desafio, não havendo ainda nesta área, uma tecnologia totalmente consolidada. A configuração de rede proposta neste trabalho, tem vantagens principalmente na área de automação predial e residencial. Também existem vantagens em aplicações específicas da concessionária de distribuição de energia elétrica, com objetivo de reduzir os custos operacionais.

Neste trabalho, foi proposta uma configuração de rede de dados local sobre a rede elétrica, utilizando a técnica CDMA, para o compartilhamento simultâneo da rede entre as unidades participantes, sendo testado um modelo para avaliar, através de simulações, o comportamento do CDMA para um canal de comunicação com ruído branco e para um canal de comunicação sujeito ao ruído medido na rede elétrica. O modelo proposto foi simulado visando definir o número de usuários que podem compartilhar simultaneamente a rede, em função da relação sinal ruído para uma determinada taxa de erro. Os resultados obtidos nas simulações para um canal com ruído branco, são compatíveis com os resultados teóricos esperados, de acordo com as equações disponíveis na literatura, mostrando que o modelo teórico utilizado para as simulações realizadas está adequado.

A partir dos gráficos apresentados, é possível observar que, considerando uma determinada relação sinal ruído, a taxa de erro para um canal com o ruído medido na rede elétrica é maior do que a taxa de erro para um canal sujeito ao ruído gaussiano.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas, mostraram a possibilidade de compartilhamento simultâneo da rede elétrica por diversos usuários, o que mostra a viabilidade de implementação da configuração de rede proposta, utilizando o CDMA

sobre a rede elétrica. O número de usuários que podem compartilhar simultaneamente a rede é função do comprimento da sequência  $PN$  utilizada como código de espalhamento de espectro. Nos resultados obtidos, pode-se observar que, para uma sequência  $PN$  de comprimento  $N = 127$ , pode-se ter 20 transmissões simultâneas mantendo-se uma taxa de erro de bits abaixo de  $10^{-4}$ . Para um número de transmissões simultâneas acima de 21, a taxa de erro de bits não diminui mesmo com o aumento da relação sinal ruído, em decorrência da interferência de múltiplo acesso.

Na tabela abaixo, é apresentado um resumo sobre os limites de transmissões simultâneas para códigos de espalhamento cujos comprimentos foram utilizados nas simulações:

$N$	<i>Limite de transmissões simultâneas</i>	
	<i>Teórica</i>	<i>Observada</i>
15	4	4
31	7	6
63	14	13
127	27	21

Para sequências  $PN$  maiores, é possível ter um número maior de usuários. Não foram efetuadas simulações utilizando códigos de espalhamento de comprimento maior, devido ao elevado tempo gasto na simulação.

É importante salientar que, na configuração proposta, o compartilhamento da rede elétrica ocorre de forma simultânea, não existindo situações de colisão como nas redes convencionais. Todos os usuários conectados à rede podem transmitir ou receber dados simultaneamente.

Deve ser enfatizado ainda que, a capacidade do sistema diz respeito ao número máximo de “transmissões simultâneas” sobre o canal de comunicação. Desta forma, a partir dos resultados apresentados pode-se observar que, por exemplo, utilizando um código de espalhamento de comprimento  $N = 127$ , é possível ter uma rede local com 21 transmissões simultâneas, mantendo uma taxa de erro de bits abaixo de  $10^{-4}$ .

## **6.2 Trabalhos futuros**

Com objetivo de adquirir um conjunto mais completo de informações, visando a implementação da configuração de rede proposta, alguns trabalhos adicionais são sugeridos.

- Ampliar o volume de amostras de ruído medido na rede elétrica, permitindo um procedimento estatístico mais confiável.
- Aprimoramento do modelo teórico, com a incorporação do módulo de sincronização, de modo aproximar mais os resultados das simulações da realidade.
- Avaliação da configuração de rede proposta, considerando outras técnicas de modulação.
- Estudo mais detalhado sobre um protocolo de comunicação que viabilize a implantação da configuração de rede proposta.
- Implementação de protótipos utilizando DSP, com objetivo de avaliar o funcionamento da configuração proposta.

## Referências

- [1] Radford, D., "Spread\_Spectrum data leap through ac power wiring", IEEE Spectrum, Vol. 33, n. 11, Nov. 1996, 48-53.
- [2] Chen, Y. F., Chiueh, T. D., "Baseband Transceiver Design of a 128-kbps Power-Line Modem for Household Application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 17, n. 2, Abr. 2002, 338-344.
- [3] Marubayashi, G., Tachikawa, S., "Spread Spectrum Transmission on Residential Power Line". 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, Vol 3, Set. 1996, 1082-1086.
- [4] Chan, L., ., Donaldson, R., "Amplitude, Width, and Interarrival Distributions for Noise Impulses on Intrabuilding Power Line Communication Networks", IEEE Transactions on Eletromagnetic Compatibility, Vol 31, n. 3, Ago. 1989, 320-323.
- [5] Dostert, Klaus., "Powerline Communications". Prentice Hall, 2001
- [6] Goiser, A. M. J., "Direct-Sequence Spread-Spectrum Modem for Data Communications over Power-Lines", Proc. MILCOM97 Proceedings, Vol 2, Nov. 1997, 1052-1056.
- [7] Ozawa, Y., Arai, T., Kohno, R., "Spread-Spectrum Data Transmission System Using the Earth Returning Circuit on a Low-voltage Distribution Line", 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, Vol 3, Set. 1996, 1097-1101.
- [8] Hooijen, O. G., "A Robust System for Digital Transmission over the Low Voltage Network Using Spread Spectrum Techniques", 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, Vol 2, Set. 1996, 804-808.
- [9] Biglieri, E., "Coding and Modulation for a Horrible Channels", IEEE Communications Magazine, Vol 41, n. 5, Mai. 2003, 92-98.
- [10] Viterbi, Andrew J., "CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication". Addison Wesley , 1995.
- [11] Haykin, Simon, "Communication Systems". John Wiley & Sons, Inc, 2001
- [12] Lam, Alex W., Tantarana, Sawasd., "Theory and Applications of Spread Spectrum Systems". IEEE, 1994.
- [13] Meel, J., "Introduction to Spread Spectrum technology", Sirius Communications. [http://www.siriuscomm.com/intro\\_pdf.htm](http://www.siriuscomm.com/intro_pdf.htm)



- [14] Van Der Gracht, P., "Communication Using Pseudonoise Modulation on Electric Power Distribution Circuits", IEEE Transactions on Communications, Vol 33, n. 9, Set. 1985, 964-974.
- [15] Lehmann, K., "Data Transmission over 230V-Power-Lines using Spread – Spectrum-Techniques", 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Vol. 2, Set 1996, 826-830.
- [16] Hensen, C., Schulz, W., "High Rate Data Communication via Power Distribution Network Using DS-CDMA Technique", 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Universal Personal Communications Record, Vol. 2, Out 1997, 805-808.
- [17] Hachem, W., et al, "Multiple Access Communication Over the Power Line Channel: A CDMA Approach", Global Telecommunications Conference GLOBECOM '01, Vol. 1, Nov 2001, 420-424.
- [18] Del Re, E., et al, "Comparison of CDMA and OFDM Techniques for Downstream Power-Line Communications on Low Voltage Grid", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 18, n. 4, Out. 2003, 1104-1109.
- [19] Pavlidou, N., et al, "Power Line Communications: State of the Art and Future Trends", IEEE Communications Magazine, Vol 41, n. 4, Apr 2003, 34-40.
- [20] Abad, J., et al, "Extending the Power Line LAN Up to the Neighborhood Transformer", IEEE Communications Magazine, Vol 41, n. 4, Apr 2003, 64-70.

# ANEXO I

## Código Matlab utilizado para as simulações

```
%-----
% Simulação da taxa de erro de bits
%
% taxa      = Taxa de transmissao
% bits_PN   = Comprimento da sequencia PN
% EbN0_inic = Valor do Eb/N0 inicial
% EbN0_fim  = Valor do Eb/N0 final
% users     = Vetor com o numero de usuarios para as simulacoes
% ncc       = Numero de ciclos da portadora por chip
% nsc       = Numero de amostras por ciclo da portadora
% tp_erro   = Tipo de erro para simulacao (AWGN/rede)
% Fd        = Taxa de amostragem do sinal CDMA (espalhado)
% Fc        = Frequencia da portadora
% Fs        = taxa de amostragem do sinal modulado
%-----
function simular
    [taxa,bits_PN,users,ncc,nsc,EbN0_inic,EbN0_fim,...
     Fd,Fc,Fs] = parametros;
    amostras_chip = ncc*nsc;
    amostras_bit  = amostras_chip*bits_PN;
    mat_erro      = formatar_matriz_erro(users,EbN0_inic,EbN0_fim);
    n_bits        = 2000;          % Numero de bits a cada simulacao
    desloc        = [0 randint(1,max(users)-1,5*amostras_bit)];
    PN            = codigo_espalhamento(max(users),bits_PN);
    v_EbN0        = 1:size(mat_erro,1);
    ruido_040     = preparar_ruido_rede('r040');
    ruido_200     = preparar_ruido_rede('r200');

    vezes         = 1;
    tot_bits      = 0;
    flag_fim      = 1;
    fator         = 2/(ncc*nsc*bits_PN);
    ind_r1        = 1;
    ind_r2        = 1;
    while(flag_fim) % Executa este laço ate atingir o numero de erros.
        sinais_bin = gerar_sinais_binarios(max(users),n_bits);
        tot_bits   = tot_bits + n_bits;
        sinais_mod = gerar_sinais_modulados(users,sinais_bin,PN,Fc(1),Fd(1),...
                                             Fs(1),desloc);
        sinal_bin  = sinais_bin(1,:);
        clear sinais_bin;
        n_smod     = size(sinais_mod,2);
        for erro = 1:1:3 % Loop para variar o tipo de erro
            fprintf('\nErro = %2d bits = %8d',erro,tot_bits);
            switch erro
```

```

case 2
    [ruído,ind_r1] = vetor_ruído(n_smod,ind_r1,ruído_040);
case 3
    [ruído,ind_r2] = vetor_ruído(n_smod,ind_r2,ruído_200);
otherwise
    ruído = '';
end
for k = 1:1:length(users)
    if (users(1) == 1)
        ind_k = k;
    else
        ind_k = k + 1;
    end
    us = users(k);
    for EbN0 = EbN0_inic:1:EbN0_fim
        i = v_EbN0((mat_erro(:,1,k)==EbN0));
        SNR = EbN0 + 10*log10(fator);
        ind = 2*erro + 1;
        if (mat_erro(i,ind+1,k) <= mat_erro(i,2,k)) & (mat_erro(i,2,k) ~= 0)
            sinal_mod_rec = criar_sinal_mod_recebido(sinais_mod([1 ind_k],:),...
                SNR,us,erro,ruído);
            sinal_demod = unipolar_bipolar(ddemod(sinal_mod_rec,...
                Fc(erro),Fd(erro),Fs(erro),'psk',2));
            sinal_rec = despread(sinal_demod,PN(1,:),1);
            dif = sinal_rec ~= sinal_bin;

            mat_erro(i,ind+1,k) = mat_erro(i,ind+1,k) + size(find(dif),2);
            mat_erro(i,ind,k) = mat_erro(i,ind,k) + n_bits;
            if tot_bits >= vezes*n_bits
                mostrar_erro(erro,mat_erro(i,:,k),taxa,bits_PN,us,1,ncc,nsc);
            end
            % end if tot_bits >= vezes*n_bits
        end
        % end if (mat_erro(i,ind+1,us)
    end
    % end for EbN0
end
% end for k
end
% end for erro
if tot_bits >= vezes*n_bits
    tot_bits = 0;
    op = input('\nNumero de vezes ');
    if ~isempty(op)
        vezes = op;
        if op == 0
            flag_fim = 0;
        end
        % end if op == 0
    end
    % end if ~isempty(op)
end
% end if tot_bits >= vezes*n_bits
gravar_erro(mat_erro,taxa,bits_PN,users,ncc,nsc)
end
% end while
return

%-----

```

```

% Formatar a matriz para armazenar os resultados da simulacao
%   Linha:      uma linha para cada valor de Eb/N0
%   Colunas:    (Eb/N0,limite erros,3x[bits simulados,erros observados])
%   Profundidade: usuarios
%-----
function matriz = formatar_matriz_erro(us,Eb_ini,Eb_fim);
    n_us      = length(us);
    EbN0_vetor = Eb_ini:1:Eb_fim;
    matriz     = zeros(length(EbN0_vetor),8,n_us);
    matriz(:,1,:) = repmat(EbN0_vetor',1,n_us);
    load lim_erros_10; % Carrega matriz lim_erros
    x         = 1:size(lim_erros,1);
    ini        = x(lim_erros(:,1)==Eb_ini);
    fim        = x(lim_erros(:,1)==Eb_fim);
    matriz(:,2,:) = lim_erros(ini:fim,[us+1]);
    clear lim_erros;
return

%-----
% Sequencias PN para o espalhamento de espectro
%   n_usuarios:  Numero de usuarios para simulacao
%   bits_PN:     Comprimento da sequencia PN
%-----
function pn = codigo_espalhamento(n_us,comp_pn);
    pn      = sequencia_PN(comp_pn,'g');
    pn      = pn(1:n_us,:);
return

%-----
% Gerar os sinais binarios para a simulacao (na forma bipolar)
%   n_usuarios:  Numero de usuarios para simulacao
%   n_bits:      Numero de bits do sinal gerado
%-----
function s_bin = gerar_sinais_binarios(n_us,bits);
    s_bin     = unipolar_bipolar(randint(n_us,bits));
return

%-----
% Gerar os sinais modulados para a simulacao
%   s_bin:      Sinal binario
%   Pn:         Codigos de espalhamento
%   fc:         Frequencia da portadora
%   fd:         Taxa de amostragem do sinal espalhado
%   fs:         Taxa de amostragem do sinal modulado
%   shf:        Deslocamento do sinal
%   s_mod:      Sinais modulados(para cada usuario)
%-----
function s_mod = gerar_sinais_modulados(us,s_bin,Pn,fc,fd,fs,shf);
    s_spread  = kron(s_bin(1,:),Pn(1,:));
    s_mod     = dmod(bipolar_unipolar(s_spread),fc,fd,fs,'psk',2);

```

```

n      = 1;
soma   = zeros(0,length(s_mod));
for k = 1:length(us)
    for i=n+1:us(k)
        s_spread = kron(s_bin(i,:),Pn(i,:));
        x        = dmod(bipolar_unipolar(s_spread),fc,fd,fs,'psk',2);
        y        = [zeros(1,shf(i)) x(1:(end-shf(i)))];
        soma      = sum(soma,1) + y;
    end
    s_mod = [s_mod;soma];
    n     = us(k);
end
return

%-----
% Criar o arquivo recebido (Sinal transmitido + ruído)
%      s_mod:   Sinais modulados
%      SNR:     Relação sinal ruído desejada
%      us:      Número de usuários
%      tp:      Tipo de ruído
%-----
function s_rec = criar_sinal_mod_recebido(s_mod,SNR,us,tp_err,ruído)
if tp_err == 1      % AWGN
    s_rec = awgn(s_mod(1,:),SNR,'measured');
else
    %n      = ceil(size(s_mod)/size(ruído));
    %ruído   = repmat(ruído,1,n);
    %ruído   = ruído(1:length(s_mod(1,:)));
    sigma   = sqrt(sum(s_mod(1,:).^2)/((10^(SNR/10))*sum(ruído.^2)));
    s_rec    = s_mod(1,:) + sigma*ruído;
end
if us == 1
    return
else
    s_rec    = s_rec + s_mod(2,:);
end
return

%-----
% Criar o vetor de ruído de tamanho compatível ao sinal modulado
%      n:      Comprimento do vetor do sinal modulado
%      ind:    Ponto de início no vetor de ruído
%      noise:  vetor de ruído original
%      n_ind:  Novo ponto de início
%      ruído:  Vetor de ruído criado
%-----
function [ruído,n_ind] = vetor_ruído(n,ind,noise)
ruído    = noise(ind:end);
falta    = n - length(ruído);
if falta == 0

```

```

        n_ind = 1;
    end
    if falta < 0
        n_ind = ind + n;
        ruido = ruido(1:n);
    end
    if falta > 0
        nv = floor(falta/length(noise));
        ruido = [ruido repmat(noise,1,nv)];
        n_ind = n - length(ruido) + 1;
        ruido = [ruido noise(1:n_ind-1)];
    end
    ruido(1:20);
return

%-----
% Mostrar os erros observados na simulacao
%     err: Vetor com os valores de erros
%     taxa: Taxa de transmissao
%     bits_PN: Comprimento da sequencia PN
%     usu: Numero de usuarios
%     nus: Numero do usuario
%     ncc: Ciclos da portadora por chip
%     nsc: Amostras por ciclo da portadora
%     EbN0: Valor de Eb/N0
%-----
function mostrar_erro(tp,err,taxa,bits_PN,usu,nus,ncc,nsc,EbN0)
    desc_erro = ['AWGN';r040';r200'];
    erro = desc_erro(tp,:);
    ind = 2*tp + 1;
    fprintf('\n%4s %6i %3i %3i %2i %2i %2i %3i %7i %7i %7i',erro,taxa,bits_PN,...
        usu,nus,ncc,nsc,err(1),err(ind),err(ind+1),err(2));
return

%-----
% Gravar em arquivo, os erros observados na simulacao
%     mat: Matriz de erros
%     taxa: Taxa de transmissao
%     usu: Vetor com o numero de usuarios
%     ncc: Ciclos da portadora por chip
%     nsc: Amostras por ciclo da portadora
%-----
function gravar_erro(mat,taxa,bits_PN,usu,ncc,nsc)
    arquivo = 'Arquivos\Result\resultados.txt';
    fid = fopen(arquivo,'wt');
    %fid = fopen(arquivo,'at');
    if fid == -1
        msg = ' Erro na abertura do arquivo';
        error([arquivo msg]);
    end

```

```

for i = 1:length(usu)
    for k = 1:size(mat,1)
        mat(k,3,i) = max([mat(k,3,i) 1]);
        mat(k,5,i) = max([mat(k,5,i) 1]);
        mat(k,7,i) = max([mat(k,7,i) 1]);
        fprintf(fid,'%5.0f %3.0f %3.0f %2.0f %2.0f %2.0f %3.0f ',...
            taxa, bits_PN, usu(i), 1, ncc, nsc, mat(k,1,i));
        fprintf(fid,'%8.0f %7.0f %8.0f %7.0f %8.0f %7.0f\n',mat(k,3,i),...
            mat(k,4,i),mat(k,5,i),mat(k,6,i),mat(k,7,i),mat(k,8,i));
    end
end
fclose(fid);
return

```

```

%-----
% Desespalhamento do sinal demodulado
%
% sinal_rec = despread(sinal_demod,PN,s_chip)
%
%     sinal_demod: sinal demodulado
%     PN          : sequencia PN
%     sinal_rec   : sinal recebido
%     s_chip      : amostras por chip
%-----

```

```
function sinal_rec = despread(sinal_demod,PN,s_chip)
```

```

    bits_PN = length(PN);      %Numero de bits da sequencia PN

    %
    % Autocorrelação - filtro casado
    %
    b = PN(bits_PN:-1:1);
    b = kron(b,ones(1,s_chip));
    a = 1;
    autocorr = filter(b,a,sinal_demod);

    %
    % Recuperação do sinal
    %
    i = bits_PN:bits_PN:length(autocorr);
    sinal_rec = sign(autocorr(i));

return

```

```

%-----
% Converte um vetor bipolar para unipolar
%
%   unipolar = bipolar_unipolar(bipolar))
%
%       bipolar = Vetor bipolar a ser convertido
%       M       = Constelação de valores
%-----

function unipolar = bipolar_unipolar(bipolar)

    unipolar = (bipolar+1)/2;

return

%-----
% Converte um vetor binario do formato unipolar para o formato bipolar
% com representacao de [1 0] para [1 -1]
%
%   Y = unipolar_bipolar(unipolar)
%-----

function bipolar = unipolar_bipolar(unipolar)

    bipolar = (2*unipolar)-1;

return

%-----
%   Plotar as taxas de erro obtidas nas simulações.
%
%   Resultados comparativos entre ruido AWGN e ruido da rede.
%   Opção de seleccionar o tipo de erro para plotagem.
%   Parametros:
%       idioma:   Idioma das legendas (P:portugues, I:ingles)
%-----
function plotar_taxas_erro_sel

    idioma      = input('\nIdioma: ');
    EbN0_ini    = input('\nValor inicial de Eb/N0: ');
    EbN0_fim    = input('\nValor final de Eb/N0: ');
    us          = input('\nUsuarios: ');
    tp_erro     = input('\nTipos de erro: ');
    arq         = [input('\nArquivo de resultados : ','s') '.txt'];
    teoria      = input('\nPlotar curvas teoricas? ','s');

    mat_erro    = preparar_taxas_erro(arq);
    mat_erro    = seleccionar(mat_erro,us,EbN0_ini,EbN0_fim);

```



```

display(size(mat_erro));
if size(mat_erro,1) == 0
    return
end

v_erro      = reshape(mat_erro(:,4:7),1,[]);
erro_min    = min(v_erro(~v_erro == 0));
display(size(erro_min));
erro_min    = 10^floor(log10(erro_min));
bits_PN     = mat_erro(1,1);

figure(1);
LW          = 1.2;
legenda     = zeros(0,9);
for i = 1:length(us)
    mat      = mat_erro(mat_erro(:,2) == us(i),:);
    if (sum(tp_erro == 1) > 0)
        linha      = estilo_linha(i,' ',1);
        %linha      = estilo_linha(i,' ',1);
        legenda     = [legenda; sprintf('k=%2d ',us(i)) 'AWGN']];
        [EbN0, erro_plot] = limitar_ber(EbN0_ini:EbN0_fim,mat(:,4),erro_min);
        semilogy(EbN0,erro_plot,linha,'LineWidth',LW);
        hold on;
    end
    if (sum(tp_erro == 2) > 0)
        linha      = estilo_linha(i,' ',2);
        legenda     = [legenda; sprintf('k=%2d ',us(i)) 'r040']];
        [EbN0, erro_plot] = limitar_ber(EbN0_ini:EbN0_fim,mat(:,5),erro_min);
        semilogy(EbN0,erro_plot,linha,'LineWidth',LW);
        hold on;
    end
    if (sum(tp_erro == 3) > 0)
        linha      = estilo_linha(i,' ',3);
        legenda     = [legenda; sprintf('k=%2d ',us(i)) 'r200']];
        [EbN0, erro_plot] = limitar_ber(EbN0_ini:EbN0_fim,mat(:,6),erro_min);
        semilogy(EbN0,erro_plot,linha,'LineWidth',LW);
        hold on;
    end
    if (sum(tp_erro == 4) > 0)
        linha      = estilo_linha(i,' ',4);
        legenda     = [legenda; sprintf('k=%2d ',us(i)) 'r20n']];
        [EbN0, erro_plot] = limitar_ber(EbN0_ini:EbN0_fim,mat(:,7),erro_min);
        semilogy(EbN0,erro_plot,linha,'LineWidth',LW);
        hold on;
    end
    if teoria == 's'
        linha      = estilo_linha(i,'-',1);
        legenda     = [legenda; sprintf('k=%2d ',us(i)) 'calc']];
        Pbe        = calcula_Pbe(us(i),bits_PN,EbN0_ini,EbN0_fim);
        [EbN0, erro_plot] = limitar_ber(EbN0_ini:EbN0_fim,Pbe,erro_min);
    end
end

```

```

        semilogy(EbN0,erro_plot,linha(1:3),'LineWidth',LW);
    end
end
axis([EbN0_ini EbN0_fim erro_min 1]);
legend(legenda);
grid on;
set(gca,'YminorGrid','off');
if idioma == 'i'
    titulo = ['Bit Error Rate CDMA: N = ' int2str(bits_PN)];
else
    titulo = ['Taxa de erro de bits CDMA: N = ' int2str(bits_PN)];
end
title(titulo,'FontSize',14);
xlabel('Eb/Jo (dB)','FontSize',14);
ylabel('BER','FontSize',14);

return;
%-----
%  Estilo da linha para plotagem
%-----
function y = estilo_linha(n,lin,err)

    cor    = ['b','r','g','m','c','y','k'];
    mark   = ['o','+','*','d','s','^','.'];

    y = [lin cor(n) mark(err)];

return

%-----
%  Selecionar matriz de erros com Eb/N0 e usuarios desejados
%-----
function m_erro = seleccionar(mat,us,ini,fim)
    ind    = (mat(:,3)>=ini)&(mat(:,3)<=fim);
    mat    = mat(ind,:);      % Seleciona Eb/N0
    m_erro = zeros(0,size(mat,2));
    for i = 1:length(us)
        m    = mat(:,2) == us(i);  % Seleciona usuarios
        m_erro = [m_erro;mat(m,:)];
    end
return

function [ebn0, ber] = limitar_ber(snr,erro,min)
    ind    = erro > min;
    ebn0   = snr(ind);
    ber    = erro(ind);
return

```

```

%-----
% Recuperar as taxas de erro do arquivo de resultados da simulação.
%
% Parametros:  arq:    nome do arquivo a ser lido
%              mat_erro: matriz com as taxas de erro
%              colunas da matriz mat_erro:
%                  1 : comprimento da sequencia PN
%                  2 : numero de usuarios
%                  3 : relação sinal ruido
%                  4 : numero de bits do sinal
%                  5 : numero de erros
%                  6 : amostras/ciclo
%-----
function mat_erro = recuperar_taxas_erro_menor(arq)

    mat_erro = zeros(0,6);
    dados = zeros(0,7);
    fid = fopen(arq,'rt');
    if fid == -1
        msg = strcat('<',arq,'> Arquivo não encontrado');
        error(msg);
        return;
    end

    reg = fgetl(fid);
    while reg ~= -1
        reg = str2num(reg);
        dados = [dados;[reg(2) reg(3) reg(7) reg(8) reg(9) reg(6) reg(4)]];
        reg = fgetl(fid);
    end

    user = dados(1,2);
    indice = dados(:,2) == user;
    mat_user = dados(indice,:);
    while(~isempty(mat_user))
        menor = seleciona_menor(mat_user);
        mat_erro = [mat_erro;menor];
        dados = dados(~indice,:);
        if isempty(dados)
            break
        end
        user = dados(1,2);
        indice = dados(:,2) == user;
        mat_user = dados(indice,:);
    end
end

```

```

fclose(fid);

return

%-----
% Selecciona o usuario com a menor taxa de erro.
%-----
function y = selecciona_menor(x)

    y = x((x(:,7) == 1),:);
    if size(y,1) == size(x,1)
        y = x(:,1:6);    % Retorna se tiver somente um usuario.
        return;
    end

    dB = x(end,3);    % Recupera EbN0 final.

    indice = 1:x(end,2);
    flag = 1;
    while (flag)
        x_dB = x((x(:,3) == dB),:);
        x_dB = x_dB(indice,:);
        menor = min(x_dB(:,5)) == x_dB(:,5);
        indice = indice(menor);
        soma = sum(menor);
        if soma > 1
            dB = dB - 1;
        else
            usuario = x_dB(menor,7);
            y = x((x(:,7) == usuario),1:6);
            return;
        end
    end
end

```